

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Snížení dodatečných ztrát u asynchronního elektromotoru s litou
klecí nakrátko**

Reductiton of Additional Losses for the Induction Squirrel-Cage
Electric Motor

2020

Bc. Karel Zielonka

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Karel Zielonka**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: Snížení dodatečných ztrát u asynchronního elektromotoru s litou klecí
nakrátko.
Reduction of Additional Losses for the Induction Squirrel-Cage Electric
Motor.

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Rozbor ztrát asynchronního motoru, výpočet a měření účinnosti.
Způsoby snížení dodatečných ztrát. Održení rotorové klece.
Realizace měření na vzorcích elektromotorů.
Multikriteriální vyhodnocení naměřených výsledků..

Seznam doporučené odborné literatury:


ČSN EN 60034-2-1 ed 2
Hrabovcová, V. a kol.: Meranie a modelovanie elektrických strojov, Žilinská univerzita, 2014
Petrov, G.N.: El. stroje 1 a 2, ACADEMIA 1980
Cigánek, L.: Elektrické stroje (kterékoliv ze 6 vydání)
Bašta, J., Chládek, J., Mayer, I.: Teorie elektrických strojů, SNTL Praha, 1968
Další dle pokynů vedoucího diplomové práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

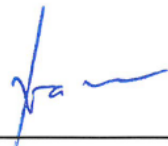
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Bernat, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *15. května 2020*



.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Petru Bernatovi, Ph.D., Ing. Janu Bajerovi a Ing. Stanislavovi Rusnokovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá rozbořem a možnostmi snížení dodatečných ztrát asynchronního motoru. Nejprve jsou v teoretické části popsány a rozděleny všechny ztráty asynchronního motoru. V druhé kapitole jsou rozebrány možnosti určování účinnosti a ztrát podle normy ČSN 60034-2-1 ed.2. Dále jsou v teoretické části rozděleny druhy přídavných ztrát a je vysvětlena jejich fyzikální podstata a možnosti výpočtu. Poslední kapitola teoretické části se zabývá možnostmi snížení přídavných ztrát. Jako jedna z variant je zde popsána metoda odtržení rotorové klece, která je poté ověřována v praktické části na jednotlivých vzorcích motorů.

Klíčová slova

Asynchronní motor; dodatečné ztráty; účinnost; ČSN 60034-2-1; snížení ztrát

Abstract

The thesis deals with the analysis and possibilities of reducing additional losses of the asynchronous motor. At first in theoretical part, all losses of the asynchronous motor are described and divided. In the second chapter are discussed possibilities of determining efficiency and losses according to standard ČSN 60034-2-1 ed.2. Further, the types of additional losses and possibilities of calculation are explained. The last chapter of the theoretical part deals with the possibilities of reducing additional losses. As one of the variants described is a method of tear of rotor cage, which is then verified in the practical part on individual samples motors.

Key words

Asynchronous motor; additional losses; efficiency; ČSN 60034-2-1; reduction losses

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
ΔP_{feh}	W	Hlavní ztráty v železe
f_l	Hz	Napájecí frekvence
ΔP_{fed}	W	Dodatečné ztráty v železe
$\Delta P_{\delta p}$	W	Povrchové ztráty
t	s	Čas
U_N	V	Jmenovité napětí
I_N	A	Jmenovitý proud
ΔP_p	W	Pulsní ztráty v zubech
ΔP_{fe}	W	Ztráty v železe
ΔP_{j1}	W	Ztráty ve statorovém vinutí
m_1	-	Počet fází statoru
R_1	Ω	Odpor statorového vinutí
R_2	Ω	Odpor rotorového vinutí
I_1	A	Statorový proud
I_2	A	Rotorový proud
ΔP_{j2}	W	Ztráty v rotorovém vinutí
m_2	-	Počet fází rotoru
n	ot/min	Otáčky motoru
ΔP_d	W	Dodatečné ztráty při zat.
η	%	Účinnost
P_2	W	Výkon
P_1	W	Příkon
ω	rad/s	Úhlová rychlost
H	A/m	Intenzita magnetického pole
B	T	Magnetická indukce
δ	mm	Vzduchová mezera

Seznam použitých obrázků

OBRÁZEK 1.1: ENERGETICKÁ BILANCE ASYNCHRONNÍHO MOTORU [10]	- 12 -
OBRÁZEK 2.1: VYHLAZOVÁNÍ DAT ZBYTKOVÝCH ZTRÁT [4]	- 16 -
OBRÁZEK 2.2: PŘÍRAZENÉ LIMITY PRO PŘÍDAVNÉ ZTRÁTY PŘI ZATÍŽENÍ P_{LL} [4]	- 18 -
OBRÁZEK 2.3: ZKUŠEBNÍ OBVOD METODY EH-STAR [4]	- 21 -
OBRÁZEK 2.4: T-MODEL ASYNCHRONNÍHO STROJE [4]	- 22 -
OBRÁZEK 3.1: PRŮBĚH PŘÍDAVNÉHO POLE [5]	- 24 -
OBRÁZEK 3.2: PRŮBĚH INTENZITY VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE [5]	- 25 -
OBRÁZEK 3.3: PRŮBĚH MAGNETICKÉ INDUKCE [5]	- 26 -
OBRÁZEK 3.4: FIKTIVNÍ ELEMENTÁRNÍ KLEC ROTORU [5]	- 29 -
OBRÁZEK 3.5: FIKTIVNÍ ELEMENTÁRNÍ KLEC ROTORU K VÝPOČTU PŘÍDAVNÝCH ZTRÁT [5]	- 29 -
OBRÁZEK 3.6: VEKTOROVÝ DIAGRAM PROUDU V ROTORU [5]	- 30 -
OBRÁZEK 3.7: PŘÍPAD VÝPOČTU PRO NEISOLOVANOU ROVNOU ROTOROVOU TYČ [5]	- 32 -
OBRÁZEK 3.8: PŘÍPAD VÝPOČTU PRO NEISOLOVANOU ZEŠIKMENOU ROTOROVOU TYČ [5]	- 32 -
OBRÁZEK 3.9: PRŮBĚH GRADIENTŮ NAPĚTÍ V TYČÍCH A PŘÍČNÝCH PROUDŮ	- 33 -
OBRÁZEK 3.10: PRŮBĚH GRADIENTŮ NAPĚTÍ V TYČÍCH A PŘÍČNÝCH PROUDŮ	- 33 -
OBRÁZEK 3.11: ZOBRAZENÍ VELIČIN K VÝPOČTU PŘÍDAVNÝCH ZTRÁT OD PŘÍČNÝCH PROUDŮ [5]	- 34 -
OBRÁZEK 4.1: PRŮBĚH MAGNETICKÉ INDUKCE NAD DRÁŽKOU [5]	- 38 -
OBRÁZEK 4.2: NAMĚŘENÉ ZTRÁTY V MOTORU PŘI POUŽITÍ RŮZNÉHO STUPNĚ IZOLACE ROTORU [9]	- 39 -
OBRÁZEK 4.3: VLIV STUPNĚ IZOLOVÁNÍ TYČÍ NA ZÁBĚRNÝ MOMENT MOTORU [9]	- 40 -
OBRÁZEK 4.4: PŘÍČNÉ PROUDY U NEZEŠIKMENÝCH DRÁŽEK ROTORU [11]	- 40 -
OBRÁZEK 5.1: ZKOUŠKA ASYNCHRONNÍHO MOTORU (VLEVO), VZOREK ZKOUŠENÉHO MOTORU (VPRÁVO) ..	- 42 -
OBRÁZEK 5.2: VIRTUÁLNÍ PANEL SLOUŽÍCÍ K OVLÁDÁNÍ PRACOVNÍMÍSTĚ	- 43 -
OBRÁZEK 5.3: PRŮBĚH ZMĚNY DODATEČNÝCH ZTRÁT PŘI ZATÍŽENÍ PO JEDNOTLIVÝCH ODTRŽÍCH	- 49 -
OBRÁZEK 5.4: PRŮBĚH ZMĚNY ÚČINNOSTI PO JEDNOTLIVÝCH ODTRŽÍCH	- 50 -
OBRÁZEK 5.5: PRŮBĚH ZMĚNY VIBRACÍ PO JEDNOTLIVÝCH ODTRŽÍCH	- 51 -
OBRÁZEK 5.6: PRŮBĚH ZMĚNY HODNOTY AKUSTICKÉHO TLAKU PO JEDNOTLIVÝCH ODTRŽÍCH	- 51 -

Seznam použitých tabulek

TABULKA 5.1: ŠTÍTKOVÉ ÚDAJE MOTORU $P_N=37$ KW	- 43 -
TABULKA 5.2: ZÁKLADNÍ ROZMĚRY MOTORU $P_N=37$ KW	- 43 -
TABULKA 5.3: VYBRANÉ NAMĚŘENÉ HODNOTY PŘI JEDNOTLIVÝCH ODTRŽÍCH	- 44 -
TABULKA 5.4: ŠTÍTKOVÉ ÚDAJE MOTORU $P_N=45$ KW	- 45 -
TABULKA 5.5: ZÁKLADNÍ ROZMĚRY MOTORU $P_N=45$ KW	- 45 -
TABULKA 5.6: VYBRANÉ NAMĚŘENÉ HODNOTY PŘI JEDNOTLIVÝCH ODTRŽÍCH	- 45 -
TABULKA 5.7: ŠTÍTKOVÉ ÚDAJE MOTORU $P_N=82,8$ KW	- 46 -
TABULKA 5.8 ZÁKLADNÍ ROZMĚRY MOTORU $P_N=82,8$ KW	- 46 -
TABULKA 5.9: VYBRANÉ NAMĚŘENÉ HODNOTY PŘI JEDNOTLIVÝCH ODTRŽÍCH	- 47 -
TABULKA 5.10: ŠTÍTKOVÉ ÚDAJE MOTORU $P_N=250$ KW	- 48 -
TABULKA 5.11: ZÁKLADNÍ ROZMĚRY MOTORU $P_N=250$ KW	- 48 -
TABULKA 5.12: VYBRANÉ NAMĚŘENÉ HODNOTY PŘI JEDNOTLIVÝCH ODTRŽÍCH	- 48 -
TABULKA 5.13: VLIV GEOMETRIE ROTORU NA ÚSPĚŠNOST ODTRŽENÍ ROTOROVÉ KLECE	- 52 -

Obsah

Úvod.....	- 11 -
1 Ztráty asynchronního motoru	- 12 -
1.1 Ztráty v železe	- 12 -
1.2 Ztráty ve vinutí	- 13 -
1.3 Ztráty mechanické a ventilační.....	- 13 -
1.4 Ztráty přídatné (dodatečné) při zatížení	- 14 -
2 Způsoby měření účinnosti a stanovení dodatečných ztrát asynchronních strojů.....	- 15 -
2.1 Metoda 2-1-1A Přímé měření příkonu a výkonu	- 15 -
2.2 Metoda 2-1-1B Součet ztrát: zbytkové ztráty.....	- 15 -
2.2.1 Přídatné ztráty při zatížení P_{LL}	- 16 -
2.3 Metoda 2-1-1C Součet ztrát: přiřazená hodnota.....	- 17 -
2.3.1 Přídatné ztráty při zatížení P_{LL}	- 17 -
2.4 Metoda 2-1-1D Zkouška rekuperací s dvojím napájením	- 18 -
2.5 Metoda 2-1-1E Rekuperace s jedním napájením.....	- 19 -
2.6 Metoda 2-1-1F Zkouška s vyjmutým rotorem a reverzními otáčkami	- 19 -
2.6.1 Přídatné ztráty při zatížení.....	- 20 -
2.7 Metoda 2-1-1G Eh-star.....	- 20 -
2.7.1 Přídatné ztráty.....	- 20 -
2.8 Metoda 2-1-1H Použití parametrů náhradního obvodu.....	- 21 -
3 Druhy dodatečných ztrát a jejich příčiny	- 24 -
3.1 Povrchové ztráty naprázdno	- 24 -
3.2 Pulsační ztráty naprázdno.....	- 25 -
3.3 Přídatné ztráty klecové kotvy naprázdno	- 26 -
3.3.1 Přídatné ztráty klecové kotvy naprázdno při zešíkmení	- 28 -
3.4 Přídatné ztráty při zatížení.....	- 31 -
3.4.1 Vliv zešíkmení drážek na přídatné ztráty při zatížení	- 31 -
4 Způsoby snížení dodatečných ztrát	- 36 -
4.1 Návrh velikosti vzduchové mezery	- 36 -
4.2 Výpočet počtu drážek rotoru	- 36 -
4.3 Úprava otevření statorové drážky.....	- 37 -
4.4 Odtržení rotorové klece	- 38 -

4.4.1	Izolování klece	39 -
4.4.2	Postup provedení odtrhů.....	41 -
5	Měření vlivu odtržení rotorové klece	42 -
5.1	Měření na motoru s jmenovitým výkonem $P_n = 37$ kW.....	43 -
5.2	Měření na motoru s jmenovitým výkonem $P_n = 45$ kW.....	45 -
5.3	Měření na motoru s jmenovitým výkonem $P_n = 82,8$ kW.....	46 -
5.4	Měření na motoru s jmenovitým výkonem $P_n = 250$ kW.....	48 -
5.5	Vyhodnocení naměřených výsledků	49 -
Závěr		53 -
Použitá literatura		55 -
Seznam příloh.....		I

Úvod

Asynchronní motory jsou díky svým parametrům jako je spolehlivost, cena, jednoduchá konstrukce a malá údržba nejrozšířenější elektromotory, využívající se především jako pohony v průmyslových oblastech. Vlivem jejich rozšířenosti jsou kladeny velmi přísné nároky na jejich vysokou účinnost. Snížením ztrát v asynchronním motoru dochází jednak ke zvýšení účinnosti, a tím nižším nákladům na provoz elektromotoru pro konkrétního zákazníka, ale také globálně k velké úspoře elektrické energie, a tím i snížení tvorby CO_2 při její výrobě. Jednou z možností, jak snížit ztráty v asynchronním elektromotoru je snížit jeho přídavné ztráty, které tvoří přibližně 1,5 %. Touto problematikou se podrobněji zabývá tato diplomová práce.

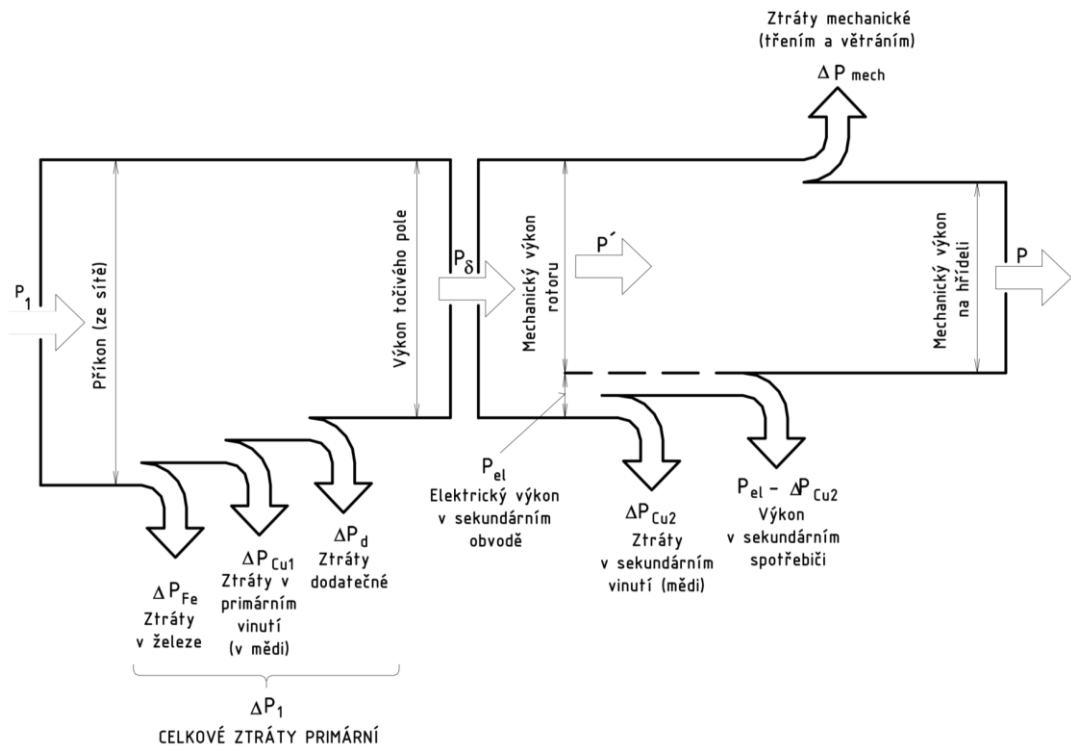
Cílem diplomové práce je vyhodnocení jedné z metod snižování přídavných ztrát asynchronního elektromotoru, a to metodou odtržení rotorové klece. Princip této metody je založený na prudkém zvýšení teploty rotoru, což způsobí oxidaci hliníkové klece a vytvoří se tak tenká vrstva oxidu hlinitého na jejím povrchu. Díky tomu se zvýší přechodový odpor mezi tyčemi klece a železem rotoru a sníží se příčné proudy, které protékají mezi tyčemi přes železo rotoru. Tento jev je především patrný u rotoru se zešíkmenými tyčemi, kde jsou tyto proudy při neizolování tyčí značné. U rotoru s rovnými tyčemi, příčné proudy nelze vyloučit, jelikož velkou roli sehrává impedance spojovacích kruhů.

Teoretická část diplomové práce je rozdělena na čtyři hlavní kapitoly. Nejprve jsou obecně rozebrány ztráty v asynchronním motoru a je zde nastíněn jejich výpočet. Druhá kapitola se zabývá určováním účinnosti a ztrát podle normy ČSN 60034-2-1 ed.2, podle které jsou měřeny i zkoumané vzorky motorů. Další kapitola pojednává o druzích přídavných ztrát, kde je vysvětlena jejich fyzikální podstata a přibližný výpočet. Na tuto kapitolu navazuje poslední část teorie, která řeší možnosti snížení přídavných ztrát, ve které je jako jedna z možností popsána metoda odtržení rotorové klece.

Praktická část diplomové práce je zaměřena na zkoumání čtyř vzorků asynchronních motorů různých výkonů (37 kW, 45 kW, 82,8 kW a 250 kW), na kterých jsou postupně provedeny čtyři odtrhy rotorové klece. Dále je provedeno porovnání a vyhodnocení naměřených výsledků, vztažené na zešíkmení rotorových tyčí a na rozměry rotoru.

1 Ztráty asynchronního motoru

Ztráty v asynchronním motoru jsou nejlépe znázorněny na obrázku energetické bilance, kde je možné vidět rozdělení ztrát, které vznikají ve statoru, a které v rotoru. Obecně se ztráty v asynchronních strojích dělí na ztráty v železe (hlavní a dodatečné), ztráty elektrické (Jouleovy) ve vinutí statoru a rotoru, ztráty dodatečné při zatížení, ztráty ventilační a mechanické. Graf energetické bilance je zobrazen níže na *obrázku 1.1. [8] [1]*



Obrázek 1.1: Energetická bilance asynchronního motoru [10]

1.1 Ztráty v železe

Hlavní ztráty v železe se při výpočtech uvažují pouze ve statoru, jelikož frekvence rotoru f_2 je úměrně závislá na velikosti skluzu, který je při chodu blízkém jmenovitému velmi malý a ztráty v železe jsou při výpočtech zanedbatelné. Hlavní ztráty v železe statoru se počítají podle vztahu:

$$\Delta P_{Feh} = \Delta p_{1,0} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot (k_{dj} \cdot B_{j1}^2 \cdot m_{j1} + k_{dz} \cdot B_{z1av}^2 \cdot m_{z1}) \quad (1.1)$$

- kde β je exponent, který závisí na druhu použité oceli,
- $\Delta p_{1,0}$ měrné ztráty v železe určující se z tabulky pro elektrotechnické oceli,
- k_{dj}, k_{dz} jsou to činitelé, které zahrnují vliv nerovnoměrnosti rozložení toku, v magnetickém obvodu statoru a vliv technologie jeho výroby,
- m_{j1}, m_{z1} hmotnosti železa a jha statoru,
- B_{j1}, B_{z1av} indukce ve jhu statoru a střední indukce v zubech statoru.

Dodatečné ztráty v železe vznikají při chodu naprázdno a skládají se ze ztrát povrchových (vznikající v povrchové vrstvě hlav zubů statoru a rotoru od pulsní indukce ve vzduchové mezeře) a pulsních ztrát v železe zubů (vznikající od pulsní indukce v zubech). Tyto ztráty jsou u motorů s vinutím nakrátko a u motorů s tyčovým vinutím velmi malé. Je to způsobeno tím, že mají rotorové drážky malé otevření a pulsace indukce ve vzduchové mezeře pod hlavami zubů jsou velmi malé. Výsledný vztah pro dodatečné ztráty v železe je pak dán součtem těchto jednotlivých ztrát:

$$\Delta P_{fed} = \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} \quad (1.2)$$

Výsledné ztráty v železe u asynchronních motorů se vypočtou pomocí součtu hlavních a dodatečných ztrát v železe. Dodatečné ztráty v železe bývají zpravidla o jeden řád nižší než hlavní ztráty v železe. [1]

$$\Delta P_{fe} = \Delta P_{feh} + \Delta P_{fed} \quad (1.3)$$

1.2 Ztráty ve vinutí

Tyto elektrické ztráty se počítají zvlášť pro statorové a rotorové vinutí. Výpočet ztrát pro statorové vinutí všech fází:

$$\Delta P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (1.4)$$

Výpočet pro rotorové vinutí se odvíjí od druhu provedení rotoru. Pro provedení s kotvou nakrátko platí vztah:

$$\Delta P_{j2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 = Q_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (1.5)$$

Výpočet pro provedení rotoru s kroužkovou kotvou:

$$\Delta P_{j2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 = m_1 \cdot R_2' \cdot I_2'^2 \quad (1.6)$$

Kroužkové provedení rotoru bez odklápeče kartáčů u asynchronních motorů způsobují navíc elektrické ztráty na kartáčích ΔP_{jk} , které se vypočtou pomocí proudu na kartáči a úbytku napětí $\Delta U_k = 1V$ pro uhlografitové kartáče a pro měďnografitkové kartáče $\Delta U_k = 0,3V$. Výsledný výpočet je dán vztahem: [1]

$$\Delta P_{jk} = m_2 \cdot \Delta U_k \cdot I_{2k} \quad (1.7)$$

1.3 Ztráty mechanické a ventilační

Mechanické ztráty vzniklé třením ložisek a ventilační ztráty pro motory s radiální a bez radiální ventilačních kanálů, s rotorem nakrátko a ventilačními lopatkami na kruzích se vypočtou podle vztahu:

$$\Delta P_{mech} = K_T \cdot \left(\frac{n}{1000}\right)^2 \cdot (10D)^3 \quad (1.8)$$

Mechanické ztráty pro motory s vnějším ofukováním, kde velikost D_e se pohybuje v rozmezí 0,1 m - 0,5 m.

$$\Delta P_{mech} = K_T \cdot \left(\frac{n}{10}\right)^2 \cdot D_e^4 \quad (1.9)$$

U kroužkových motorů bez odklápěče kartáčů vznikají rovněž mechanické ztráty vzniklé třením kartáčů a jsou dány vztahem: [1]

$$\Delta P_{fk} = K_f \cdot p_k \cdot S_k \cdot v_k \quad (1.10)$$

kde K_f je součinitel tření kartáčů o kroužky,
 p_k tlak vyvíjející se na kontakt,
 S_k celková dosedací plocha všech kartáčů,
 v_k obvodová rychlost kroužků.

1.4 Ztráty přídatné (dodatečné) při zatížení

Jsou to ztráty, které vznikají působením rozptylových toků, pulsací indukce ve vzduchové mezeře, stupňovitý průběh výsledného magnetického napětí vinutí statoru a rotoru a další. U motoru s kotvou nakrátko také vznikají ztráty vzniklé příčnými proudy, které se uzavírají přes plechy rotorového svazku. Hodnota těchto ztrát je stanovena normou pro jmenovité zatížení a při výpočtu motorů pro jiné, než jmenovité zatížení se přídatné ztráty přepočítávají v poměru druhé mocniny proudu, jak je uvedeno ve vztahu: [1]

$$\Delta P_d = \Delta P_{dN} \cdot \left(\frac{I_1}{I_N} \right)^2 \quad (1.11)$$

2 Způsoby měření účinnosti a stanovení dodatečných ztrát asynchronních strojů

Standartními metodami určování dodatečných ztrát a účinností asynchronních strojů se zabývá norma ČSN EN 60034-2-1 ed. 2. První tři zkušební metody jsou určeny jako přednostní zkušební metody s nízkou nejistotou měření, přičemž výběr závisí na druhu a jmenovitých hodnotách zkoušeného stroje. Další zkušební metody se mohou používat pro jakoukoliv zkoušku. Mezi tyto zkoušky patří provozní zkoušky, přijímací zkoušky podle přání zákazníka nebo výrobní kusové zkoušky.

2.1 Metoda 2-1-1A Přímé měření příkonu a výkonu

Zkouška se provádí při požadovaném zatížení v ustáleném tepelném stavu. Měřený stroj se připojí k dynamometru nebo zatěžovacímu stroji s měřičem točivého momentu a zaznamenávají se hodnoty $U, I, P_{el}, n, T, \theta_c$. Účinnost se poté vypočte ze vztahu:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.1)$$

kde v motorickém režimu je příkon $P_1 = P_{el}$ a výkon $P_2 = P_{mech}$.

Tento způsob měření se aplikuje na všechny jednofázové asynchronní stroje a k jeho provedení je potřeba dynamometr pro plné zatížení stroje. [4]

2.2 Metoda 2-1-1B Součet ztrát: zbytkové ztráty

Při této zkušební metodě se účinnost stanovuje pomocí celkových ztrát, které jsou dané součtem těchto dílčích ztrát:

- Ztráty v železe;
- Ventilační ztráty a ztráty třením (nutné korigovat);
- Ztráty v mědi ve statoru a rotoru;
- Přídavné ztráty při zatížení.

Účinnost je určena ze vztahu:

$$\eta = \frac{P_{1,0} - P_T}{P_{1,0}} = \frac{P_2}{P_2 + P_T} \quad (2.2)$$

kde

$P_{1,0}$ příkon korigovaný na teplotu ze zkoušky při jmenovitém zatížení;

P_2 výkon ze zkoušky při jmenovitém zatížení;

P_T celkové ztráty.

První vztah se upřednostňuje pro motor a druhý pro generátor. Tento způsob měření se aplikuje na asynchronní trojfázové stroje s jmenovitým výkonem do 2 MW. K provedení měření je potřebný dynamometr nebo přístroj pro měření točivého momentu pro 125% zatížení stroje. [4]

2.2.1 Přídavné ztráty při zatížení P_{LL}

Přídavné ztráty se určují pro každý zatěžovací bod odečtením výkonu, nekorigovaných ztrát ve statorovém vinutí, ztráty v rotorovém vinutí odpovídající hodnotě skluzu, ztráty v železe, ventilační ztráty a ztráty třením od příkonu. Tyto hodnoty se musí vyhladit použitím lineární regresivní analýzy, jejíž vyjádření závisí na druhé mocnině zatěžovacího momentu, jak je uvedeno ve vztahu:

$$P_{Lr} = A \times T^2 + B \quad (2.3)$$

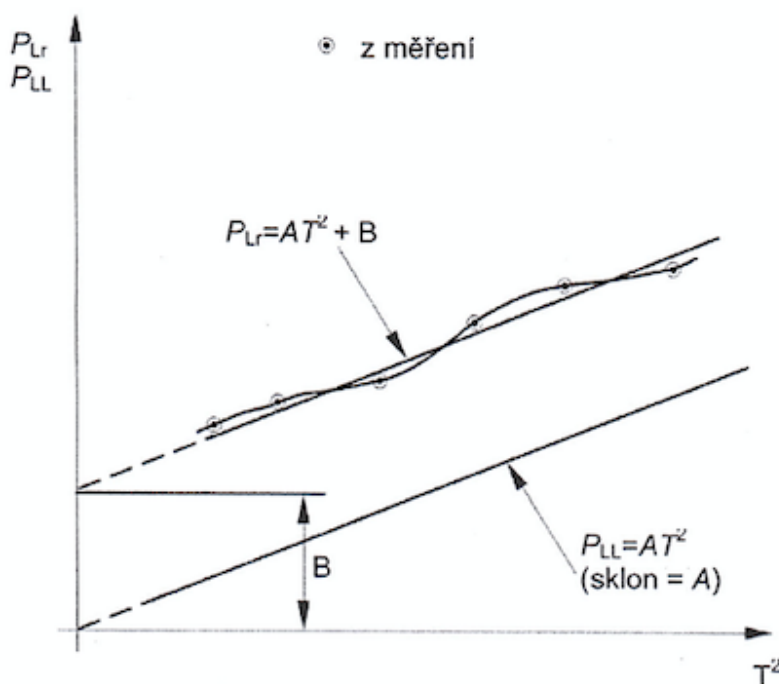
kde konstanta A je sklon a konstanta B je poloha průsečíku. Tyto konstanty jsou určeny ze šesti zatěžovacích bodů a vycházejí ze vztahů:

$$A = \frac{i \cdot \sum(P_{Lr} \cdot T^2) - \sum P_{Lr} \cdot \sum T^2}{i \cdot \sum(T^2)^2 - (\sum T^2)^2} \quad (2.4)$$

$$B = \frac{\sum P_{Lr}}{i} - A \cdot \frac{\sum T^2}{i} \quad (2.5)$$

kde i je celkový počet sečtených zatěžovacích bodů.

Vyhlazování zbytkových dat je zobrazeno na *obrázku 2.1*, který zobrazuje příklad kladné hodnoty konstanty B.



Obrázek 2.1: Vyhlazování dat zbytkových ztrát [4]

Součástí výpočtu je také korelační koeficient, jehož hodnota nesmí být menší než 0,95. V případě, že je jeho hodnota menší, nezapočítává se nejhorší bod a výpočet se opakuje. Pokud je hodnota stále menší zkouška se považuje za neuspokojivou a vzniklá chyba je způsobena v přístrojovém

vybavení nebo chybou odečtených zkušebních hodnot. Ideální hodnota korelačního koeficientu se pohybuje kolem hodnoty 0,98 a výše. Vztah pro výpočet korelačního koeficientu je následovný:

$$\gamma = \frac{i \times \sum(P_{Lr} \cdot T^2) - (\sum P_{Lr}) \times (\sum T^2)}{\sqrt{i \times \sum(T^2)^2 - (\sum T^2)^2} \times i \times \sum P_{Lr}^2 - (\sum P_{Lr}^2)^2} \quad (2.6)$$

Jestliže je stanovena konstanta sklonu A, dopočítávají se pro každý zatěžovací bod přídatné ztráty při zatížení pomocí vzorce: [4]

$$P_{LL} = A \times T^2 \quad (2.7)$$

2.3 Metoda 2-1-1C Součet ztrát: přiřazená hodnota

Při této zkušební metodě se účinnost určuje obdobně jako u metody 2-1-1B součtem jednotlivých dílčích ztrát. Pro jmenovité výkony nad 2 MW je zkouška při plném zatížení ve většině případů těžce proveditelná, a proto se obvykle provádí zkouška při zatížení se sníženým napětím a s přiřazenou hodnotou pro přídatné ztráty. Celkové ztráty se berou jako součet těchto ztrát:

- Konstantní ztráty;
- Ztráty při zatížení;
- Přídatné ztráty při zatížení.

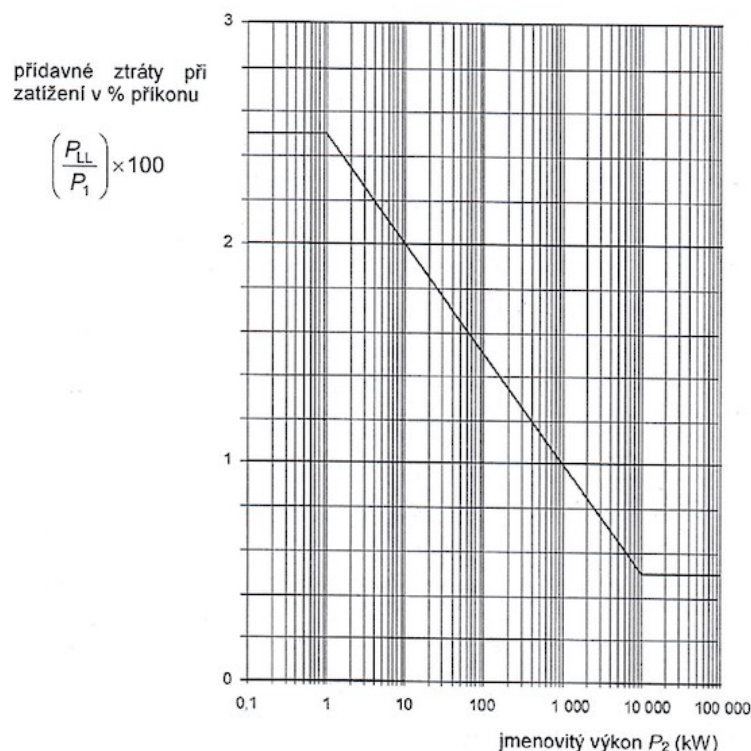
Účinnost se vypočte ze vztahu:

$$\eta = \frac{P_1 - P_T}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_T} \quad (2.8)$$

Opět platí, že prvnímu vztahu se dává přednost pro motor a druhému pro generátor. Požadavky na vybavení zkoušky jsou stejné jako u metody 2-1-1B. [4]

2.3.1 Přídatné ztráty při zatížení P_{LL}

Přídatné ztráty při jmenovitém zatížení se určují z křivky pro jmenovitý výkon stroje a jsou dané jako podíl jeho příkonu. Pokud se určují přídatné ztráty pro jiný, než jmenovitý výkon předpokládá se, že se přídatné ztráty při zatížení mění s rozdílem druhé mocniny primárního proudu a proudu naprázdno. Křivka pro získání přídatných ztrát při zatížení z jmenovitého výkonu je zobrazena na obrázku 2.2 níže. [4]



Obrázek 2.2: Přiřazené limity pro přidavné ztráty při zatížení P_{LL} [4]

2.4 Metoda 2-1-1D Zkouška rekuperací s dvojím napájením

U této zkušební metody je nutné mít dva identické stroje určené pro plné zatížení, které se mechanicky spojí dohromady. Zkouška se provádí tak, že se napájecí zdroje vymění, ale měřicí přístroje zůstávají u stejného stroje. Jeden stroj je napájen jmenovitým napětím a kmitočtem a druhý je napájen kmitočtem, který musí být nižší, než kmitočet pro generátorický chod prvního stroje nebo vyšší než pro motorický chod. Napětí musí být dostatečné k dosažení jmenovitého poměru napětí ke kmitočtu. Poté se vymění pozice motoru a generátoru a zkouška se opakuje. Při každém měření se zaznamenávají tyto hodnoty:

- U_M, P_1, I_M, f_M, s_M , pro motor;
- U_G, P_2, I_G, f_G, s_G , pro generátor;
- θ_C .

Účinnost se vypočte z poloviny celkových ztrát a průměrného příkonu motoru a generátoru pomocí vztahu:

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{\frac{P_1 + P_2}{2}} \quad (2.9)$$

kde

$$P_T = \frac{1}{2}(P_2 - P_1) \quad (2.10)$$

2.5 Metoda 2-1-1E Rekuperace s jedním napájením

Tento typ zkušební metody je vhodný pro asynchronní stroje s vinutým rotorem. Zkouška se provádí mechanickým spojením dvou identických strojů, které se elektricky připojí k napájení. Jeden stroj pracuje v režimu generátor a druhý jako motor při jmenovitých otáčkách a jmenovitém napětí. Dále se zkratuje rotorové vinutí motoru a rotorové vinutí generátoru se připojí k vícefázovému napájení, které je vhodné dodávat jmenovitý proud rotoru při skluzovém kmitočtu. Aby byl dosažen požadovaný výkon motoru musí se provést úprava kmitočtu a proudu napájecího zdroje s nízkým kmitočtem. Při měření se zaznamenávají tyto veličiny:

- U_1, P_1, I_1 napájení se sítovým kmitočtem;
- U_r, P_r, I_r napájení s nízkým kmitočtem;
- U_M spotřebovaný na svorkách motoru;
- P_G dodaný na svorky generátoru;
- θ_C .

Účinnost se poté určuje při jmenovitých podmínkách, přičemž se polovina celkových ztrát přiřadí každému stroji.

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{P_M} \quad (2.11)$$

kde

$$P_T = \frac{1}{2}(P_1 + P_r) \quad (2.12)$$

P_M je výkon spotřebovaný na svorkách motoru

P_T jsou celkové ztráty, které jsou definované jako polovina celkových spotřebovaných ztrát.

2.6 Metoda 2-1-1F Zkouška s vyjmutým rotorem a reverzními otáčkami

Při určování účinnosti se vychází obdobně jako u metody 2-1-1B pomocí součtu dílčích ztrát s tím rozdílem, že přídatné ztráty při zatížení se určují kombinací zkoušky s vyjmutým rotorem a zkoušky reverzačními otáčkami. V průběhu těchto zkoušek musí být stator napájen souměrným vícefázovým proudem s jmenovitým kmitočtem. Zaznamenávají se čtyři hodnoty proudu v rozmezí od 25 % - 100 % jmenovité hodnoty a dvě hodnoty nad 100 % (maximálně do 150 %) s ohledem na oteplení stroje a možného rizika přehřátí. Poté se vypočte zatěžovací proud ze vztahu:

$$I_L = \sqrt{I^2 - I_0^2} \quad (2.13)$$

kde

I hodnota statorového proudu během zkoušky, dodávající požadovaný zatěžovací proud;

I_0 proud naprázdno při jmenovité hodnotě napětí.

Účinnost je stanovena ze vztahu: 2.2, který je popsán v metodě 2-1-1B, kde celkové ztráty jsou dané součtem konstantních ztrát, ztrát při zatížení a přídavných ztrát při zatížení. [4]

2.6.1 Přídavné ztráty při zatížení

Vyhazení zkušební hodnoty statorových příkonu $P_{1,r m}$ a $P_{1,\pi}$ a výkonu na hřídeli ($P_{D,\pi} - P_{0,\pi}$) vůči logaritmu výkonů a proudů se provádí použitím regresní analýzy.

K určení přídavných ztrát při zatížení v určitém pracovním bodě se nejprve vypočte přibližná hodnota jmenovitého zatěžovacího proudu I_{NL} , který odpovídá jmenovitému statorovému fázovému proudu a pro tuto hodnotu se poté vypočtou ztráty rozptylem při jmenovitém zatížení P_{NLL} .

$$I_{NL} = \sqrt{I_N^2 - I_0^2} \quad (2.14)$$

kde

I_N jmenovitá hodnota statorového fázového proudu

I_0 hodnota statorového proudu naprázdno.

$$P_{NLL} = A_{Drr} \times I_{NL}^{N3} + 2A_{r m} \times I_{NL}^{N1} - A_{TT} \times I_{NL}^{N2} - 6I_{NL}^2 \times (R_{sr m} - 0,5R_{srr})$$

Dále se obdobně jako hodnota jmenovitého zatěžovacího proudu vypočte hodnota zatěžovacího proudu I_L v jakémkoliv pracovním bodu pomocí vztahu:

$$I_L = \sqrt{I^2 - I_0^2} \quad (2.15)$$

Nakonec se dopočtou ztráty rozptylem P_{LL} v libovolném pracovním bodu. [4]

$$P_{LL} = P_{NLL} \times \left(\frac{I_L}{I_{NL}} \right)^2 \quad (2.16)$$

2.7 Metoda 2-1-1G Eh-star

Tato metoda opět určuje účinnost pomocí součtu dílčích ztrát, pouze se případné ztráty při zatížení určují pomocí zkoušky Eh-star. Účinnost je poté stanovena ze vztahu: 2.2, který je popsán v metodě 2-1-1B, kde celkové ztráty jsou dané součtem konstantních ztrát, ztrát při zatížení a přídavných ztrát při zatížení.

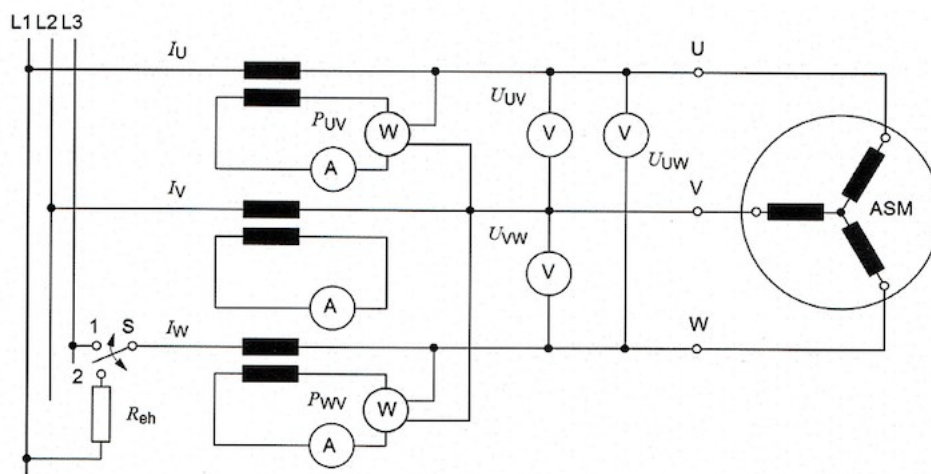
2.7.1 Přídavné ztráty

K určení přídavných ztrát při zatížení pomocí této metody musí motor pracovat samostatně a musí být napájen nesouměrným napětím. Motor musí být zapojen do hvězdy a nesmí být připojen k nulovému bodu sítě nebo zemi, aby se zabránilo nulovým složkám proudů. Třetí fáze motoru se připojí k elektrické síti přes rezistor, který se nastavuje tak, aby sousledná složka proudu zůstala pod 30 % zpětné složky. Jeho hodnota by se však neměla lišit víc než o 20 % oproti jeho typické hodnotě, která se vypočte ze vztahu uvedeného níže (první vztah platí pro motory zapojující se do hvězdy a druhý pro motory pracující do trojúhelníku).

$$R'_{eh} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} \cdot 0,2 \quad (2.17)$$

$$R'_{eh} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_N}{I_N} \cdot 0,2 \quad (2.18)$$

Schéma zapojení pro zkušební obvod metody Eh-star je zobrazen na obrázku Obr. 2.3.



Obrázek 2.3: Zkušební obvod metody Eh-star [4]

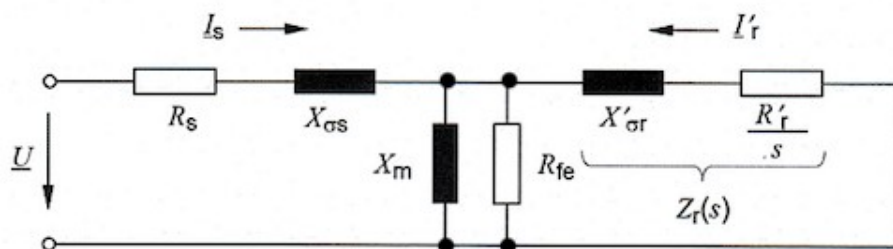
Vyhlažování dat se provádí použitím lineární regresivní analýzy. Ztráty se musí vyjádřit jako funkce druhé mocniny zpětného proudu $I_{i(2)}$ ke zkušebnímu proudu I_t , jak je uvedeno ve vztahu:

$$P_{Lr} = A \cdot \left(\frac{I_{i(2)}}{I_t} \right)^2 + B \quad (2.19)$$

Další postup výpočtu je stejný jako u Metody 2-1-1B. [4]

2.8 Metoda 2-1-1H Použití parametrů náhradního obvodu

Tato zkušební metoda se pro určení účinnosti používá jen tehdy, pokud není možné provést zatěžovací zkoušku. Vychází se ze standartního T-modelu jedné fáze asynchronního stroje, který zahrnuje náhradní odpor, který je ekvivalentní ztrátám v železe. Parametry jednotlivých prvků na straně rotoru se přepočítávají na stranu statoru (označeno apostrofem), jak je zobrazeno na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: *T-model asynchronního stroje [4]*

Pro použití metody na asynchronní stroje nakrátko je nutné mít k dispozici tyto navržené hodnoty:

- Poměr rozptylové reaktance statoru k rozptylové reaktanci rotoru.
- Teplotní koeficient rotorových vinutí.
- Rozptylová reaktance statoru a magnetizační reaktance.

Určení účinnosti vychází z výpočtu celkových ztrát:

$$P_T = P_s + P_{fe} + P_r + P_{LL} + P_{fW} \quad (2.20)$$

kde ztráty ve statorovém a rotorovém vinutí se vypočtou:

$$P_s = 3 \cdot I_s^2 \cdot R_s \quad (2.21)$$

$$P_r = 3 \cdot I_r'^2 \cdot R_r' \quad (2.22)$$

Ztráty v železe:

$$P_{fe} = 3 \cdot I_s^2 \cdot \frac{1}{Y_g^2 \cdot R_{fe}} \quad (2.23)$$

Přídavné ztráty při zatížení se určí z hodnoty $P_{LL,N}$ při jmenovitém zatížení pomocí metody přiřazené hodnoty, naměřené hodnoty pomocí zkoušky reverzačními otáčkami nebo zkoušky Eh-star.

$$P_{LL} = P_{LL,N} \cdot \left(\frac{I_r'}{I_{r,N}} \right)^2 \quad (2.24)$$

Výsledný vztah pro účinnost je následovný:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.25)$$

kde elektrický příkon P_1 a výkon na hřídeli P_2 :

$$P_1 = 3 \cdot I_s^2 \cdot R \quad (2.26)$$

$$P_2 = P_1 - P_T \quad (2.27)$$

Je nutné, aby skluz byl korigován a výpočet proudu a ztrát se opakoval do té doby, dokud hodnota P_2 v motorickém chodu nebude dostatečně blízko požadované hodnotě. [4]

3 Druhy dodatečných ztrát a jejich příčiny

Dodatečné ztráty se skládají z více druhů ztrát. Vyskytují-li se při chodu naprázdno a nemění se již se zatížením stroje nazývají se dodatečné ztráty naprázdno (povrchové a pulsní). Další druh dodatečných ztrát se nazývá dodatečné ztráty při zatížení a projevují se pouze v závislosti na zatěžovacím proudu. [1]

3.1 Povrchové ztráty naprázdno

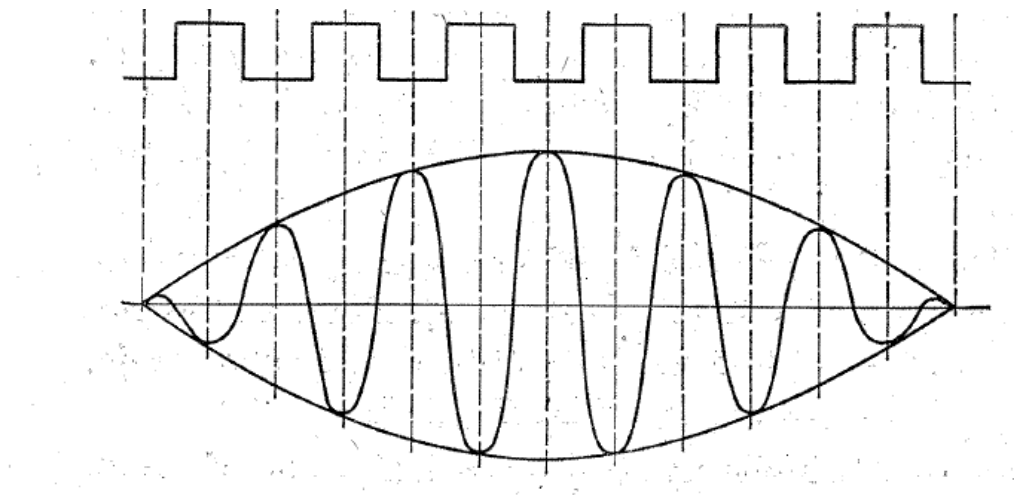
Povrchové ztráty naprázdno vznikají vlivem drážkování statoru a rotoru, které působí na průběh intenzity magnetického pole a deformují jej. Pro představu, uvažuje-li se pouze drážkování statoru pro stroj s hladkým rotorem vznikne původní pole o intenzitě H_0

$$H_0(\alpha, t) = H_0 \cdot \cos(\omega t - p\alpha) \quad (3.1)$$

a přídavné pole o intenzitě H_1 .

$$H_1(\alpha, t) = H_1 \cdot \cos(\omega t - p\alpha) \cdot \cos Z_1 \alpha \quad (3.2)$$

Průběh tohoto přídavného pole je zobrazen na *obrázku 3.1*.



Obrázek 3.1: Průběh přídavného pole [5]

Při otáčení se železného rotoru v klasickém chodu vzhledem k přídavnému poli jsou otáčky téměř synchronní a vznikají na povrchu rotoru vířivé proudy, které způsobují dodatečné ztráty a následné oteplení železa rotoru. Tímto způsobem vznikají také dodatečné ztráty na povrchu statoru. Při výpočtu povrchových ztrát se uvažuje rotor jako masivní dlouhý válec, kolem kterého obíhá magnetické pole o určité intenzitě, kde hraje roli velikost rozteče jednotlivých pólů. Tímto polem jsou v rotoru indukovány vířivé proudy. Dále se ve výpočtech aplikují Maxwellovy rovnice, ze kterých se vypočte intenzita pole a následně proudová hustota. [5]

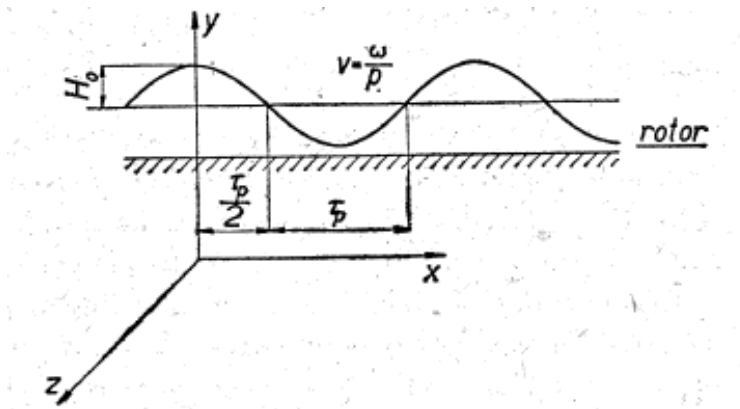
Celkový výkon vířivých proudů na povrchu rotoru je pak dán vztahem:

$$P_v = \frac{2pl}{\chi} \cdot (a \cdot \tau_p)^3 \cdot \left(\frac{B_0}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_0} \right)^2 \quad (3.3)$$

Tento vztah je nutné upravit, aby se mohl správně použít k výpočtu povrchových ztrát na rotoru způsobených drážkováním statoru. Za počet pólů indukujícího pole se dosadí počet drážek Z_1 a za pólovou rozteč τ_p se dosadí polovina drážkové rozteče $\frac{1}{2}t_{d1}$. Po upravení je výsledná rovnice pro výpočet výkonu vířivých proudů na povrchu rotoru:

$$P_v = \frac{2Z_1 l}{x} \cdot \left(a' \cdot \frac{t_{d1}}{2}\right)^3 \cdot \left(\frac{B_0}{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_0}\right)^2 \quad (3.4)$$

Na *obrázku 3.2* jsou znázorněny veličiny, které jsou potřebné pro výpočet povrchových ztrát. [5]



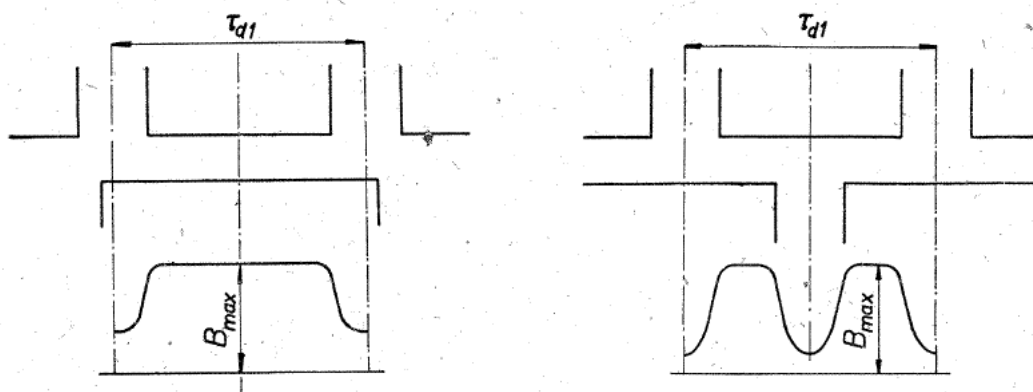
Obrázek 3.2: Průběh intenzity ve vzduchové mezeře [5]

3.2 Pulsační ztráty naprázdno

Tyto ztráty jsou způsobeny vlivem drážkování statoru, rotoru a jejich vzájemnou pozicí mezi sebou. V případě, že je zub statoru proti zubu rotoru je magnetická vodivost vzduchové mezery maximální a tím i hodnota magnetického toku. Naproti tomu, když je zub statoru proti drážce rotoru je magnetická vodivost vzduchové mezery i hodnota magnetického toku minimální. Při chodu motoru dochází k neustálým periodickým změnám těchto poloh, tudíž se mění i magnetická vodivost a magnetický tok, který prochází statorovým zubem. Hodnota magnetického toku pulsuje mezi maximální a minimální hodnotou a následně způsobuje dodatečné ztráty vířivými proudy v železe magnetického obvodu statoru. [5]

Na *obrázku 3.3* (vlevo) je zobrazen průběh magnetické indukce nad drážkovou roztečí t_{d1} ve stavu, kdy je zub statoru proti zubu rotoru. Na *obrázku 3.3* (vpravo) je pak průběh magnetické indukce nad drážkovou roztečí t_{d1} , když je zub statoru proti drážce rotoru. Pokud je tento průběh při jednotkovém magnetickém napětí, pak platí pro magnetický tok a oba případy tento vztah:

$$\phi_{1,2} = \int_{-\frac{1}{2}t_{d1}}^{+\frac{1}{2}t_{d1}} f(x)dx \quad (3.5)$$



Obrázek 3.3: Průběh magnetické indukce [5]

Když se rotor otáčí synchronními otáčkami dochází ke vzájemné změně polohy statorových a rotorových zubů s frekvencí f_1 , která se vypočte podle vztahu:

$$f_1 = f_z = Z_2 \cdot f \quad (3.6)$$

Magnetický tok v zubech rovněž pulsuje s frekvencí f_1 a jeho amplituda střídavé složky se vypočte:

$$\phi_p = \frac{\phi_1 - \phi_2}{2} \quad (3.7)$$

Výsledné měrné pulsační ztráty v zubech statoru, které jsou způsobené pulsační magnetického toku jsou dány vztahem:

$$P_{p1} = \sigma \cdot \left(\frac{f_z \cdot B_p}{100} \right)^2 \quad (3.8)$$

kde

f_z frekvence magnetického toku

B_p indukce pulsujícího toku v zubu statoru

Střední indukce B_{0z} i amplituda pulsace indukce B_p je u asynchronního stroje rozložena podél vrtnutí sinusově. Z toho důvodu je nutné do rovnice dosadit efektivní hodnotu. Dále úpravou frekvence f_z a respektováním vlivu opracování se dostane výsledný vztah pro pulsační ztráty. [5]

$$P_{p1} \cong (3 \cdot n_s \cdot Z_2 \cdot B_{p1})^2 \cdot 10^{-8} \quad (3.9)$$

3.3 Přídavné ztráty klecové kotvy naprázdno

Průběh magnetická indukce ve vzduchové mezeře $B_{(\alpha,t)}$ lze vyjádřit vztahem:

$$B_{(\alpha,t)} = B_{p\delta} \cdot \sin(\omega t - p x) + \frac{a_1}{2a_0} \cdot B_{p\delta} \{ \sin[\omega t - (Z_1 + p)\alpha] + \sin[\omega t + (Z_1 - p)\alpha] + \dots \} \quad (3.10)$$

Při chodu naprázdno se rotor otáčí téměř synchronní úhlovou rychlostí je relativní rychlost harmonických ω_v' uvažovaných v předchozí rovnici: 3.10 vypočtena podle vztahu:

$$\omega_{v1}' = \frac{\omega}{p} - \frac{\omega}{Z_1 + p} \quad (3.11)$$

$$\omega_{v1}' = \frac{\omega}{p} + \frac{\omega}{Z_1 - p} \quad (3.12)$$

Tento vztah je možné uvažovat za předpokladu, když $Z_1 \gg p$. Relativní rychlost těchto drážkových polí vzhledem k rotoru je prakticky totožná se synchronní rychlostí. Vlivem těchto polí je ve vinutí rotoru indukováno napětí, přičemž jejichž frekvence je téměř totožná a při zjednodušení lze napsat tento vztah:

$$f_1' \approx f_2' \approx \frac{f \cdot Z_1}{p} \quad (3.13)$$

kde

f je frekvence sítě.

Díky tomuto zjednodušení lze uvažovat, že na klecové vinutí rotoru, které má Z_2 tyčí působí pole prvního řádu, které má magnetickou indukci, vlivem které vznikají přídavné ztráty. Je vyjádřena vztahem:

$$B_{(a,t)} = B_{p\delta} \cdot \frac{a_1}{2a_0} \cdot \sin(\omega t - Z_1 \cdot \alpha) \quad (3.14)$$

Vzhledem k tomu, že rotorový kmitočet je mnohem větší, než kmitočet sítě je možné předpokládat, že rotorový proud I_2 je reaktivní a je možné upravit rovnici: 3.14 do tvaru:

$$B_{p\delta} \cdot \frac{a_1}{2a_0} = \mu_0 \cdot a_0 \cdot I_2 \cdot \frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} (1 + \tau) \quad (3.15)$$

kde

τ je celkový činitel rozptylu.

Z této rovnice pro rotorový proud platí vztah:

$$I_2 = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot B_{p\delta} \cdot \frac{a_1}{2a_0} \cdot \frac{1}{a_0} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{1}{1 + \tau} \quad (3.16)$$

Dále pro ztráty v celé kleci způsobené polem o magnetické indukci vyjádřené v rovnici: 3.15 platí vztah:

$$P'_{20} = I_2^2 \cdot R_2 \cdot k_f \cdot Z_2 \quad (3.17)$$

kde

k_f je koeficient respektující zvýšení odporu tyče klece R_2 vlivem zvýšeného kmitočtu.

Celkové ztráty od obou drážkových polí jsou dvojnásobné. Úpravou rovnice: 3.17 se dostane výsledný vztah:

$$P_{20} = 6,25 \cdot B_{p\delta}^2 \cdot \left(\frac{a_1}{2a_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{a_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^2 \cdot \frac{R_2 \cdot k_f \cdot Z_2}{(1 + \tau)^2} \cdot 10^{12} \quad (3.18)$$

Činitel rozptylu τ se skládá ze součtu těchto činitelů: drážkového rozptylu, rozptylu v čelech a diferenčního rozptylu. [5]

3.3.1 Přídavné ztráty klecové kotvy naprázdno při zešikmení

Při zešikmení rotorových tyčí se rozlišují dva různé případy. Rotorové tyče, které jsou izolované proti železu rotoru a rotorové tyče, které izolované nejsou. V případě šikmých izolovaných tyčí jsou ztráty v kleci při chodu naprázdno definované vztahem:

$$P_{20s} = \frac{P_{20}}{2} \left\{ \left[\frac{\sin \frac{b \cdot \pi}{td_1 \cdot Z_1} \cdot (Z_1 + p)}{\frac{b \cdot \pi}{td_1 \cdot Z_1} \cdot (Z_1 + p)} \right]^2 + \left[\frac{\sin \frac{b \cdot \pi}{td_1 \cdot Z_1} \cdot (Z_1 - p)}{\frac{b \cdot \pi}{td_1 \cdot Z_1} \cdot (Z_1 - p)} \right]^2 \right\} \quad (3.19)$$

kde

P_{20} jsou ztráty klece při rovných tyčích,

Z_1 je počet statorových drážek,

td_1 je drážková rozteč statoru,

b je velikost zešikmení.

Natočením tyčí o jednu statorovou rozteč se výsledný vztah upraví do tvaru:

$$P_{20} = P_{20s} = \frac{P_{20}}{2} \left\{ \left[\frac{\sin \pi \cdot \frac{Z_1 + p}{Z_1}}{\pi \cdot \frac{Z_1 + p}{Z_1}} \right]^2 + \left[\frac{\sin \pi \cdot \frac{Z_1 - p}{Z_1}}{\pi \cdot \frac{Z_1 - p}{Z_1}} \right]^2 \right\} \quad (3.20)$$

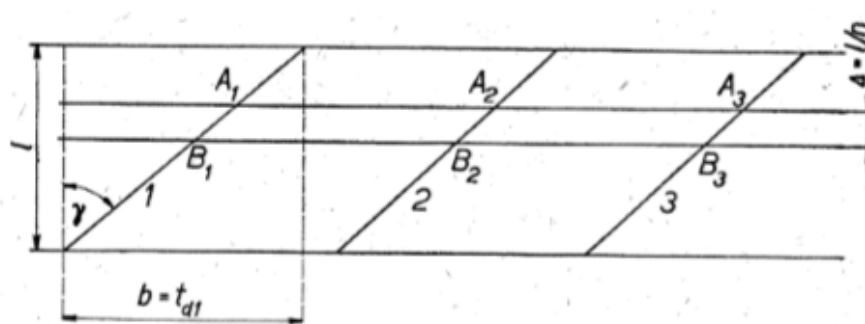
Vzhledem k tomu, že $Z_1 \gg p$ lze vztah upravit na jednodušší výraz ve tvaru:

$$P_{20s} \approx P_{20} \left(\frac{p}{Z_1} \right)^2 \quad (3.21)$$

Z předchozího vztahu je vidět, že u izolovaných tyčí se zešikmením o jednu statorovou drážkovou rozteč přídavné ztráty sníží o zanedbatelnou hodnotu.

V případě zešikmených tyčí neizolovaných od železa rotoru vznikají příčné proudy, které tečou železem rotoru od jedné tyče k sousední tyči. Přesný výpočet příčných proudů je velmi obtížný, a proto k vysvětlení se používá přibližný způsob výpočtu, který dobře vysvětluje fyzikální podstatu a vystihuje vliv hlavních veličin na přídavné ztráty při zešikmení o jednu statorovou drážkovou rozteč.

Na obrázku 3.4 níže je zobrazen rozvinutý povrch rotoru, který má neizolované tyče zešikmeny ve směru vrtání o jednu statorovou drážkovou rozteč, tedy $b = td_1$. [5]



Obrázek 3.4: Fiktivní elementární klec rotoru [5]

Fiktivní klec je tvořena „Z₂“ tyčemi A_1B_1 , A_2B_2 , ... a dvěma fiktivními čelními kruhy $A_1A_2A_3...$ a $B_1B_2B_3...$.

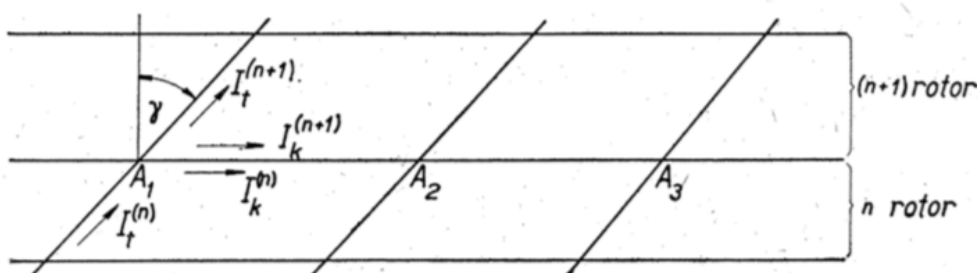
Impedance fiktivních čelních kruhů elementární klece je vlivem působení přechodového odporu mnohem větší, než impedance tyčí. Příčná impedance $Z_p \gg Z_1$, a to má vliv na snížení proudu v tyči I_t . Toto snížení se respektuje součinitelem γ_p , který se pohybuje v rozmezí 0,3 – 0,4. Při uvažování velikosti součinitele $\gamma_p = 0,35$ bude výsledný proud v tyči popsán vztahem:

$$I_t = 0,31 \cdot \frac{B_\delta}{a_0} \cdot \frac{a_1}{a_0} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{1}{1 + \tau'_d} \cdot 10^6 \quad (3.22)$$

Pro proud v kruhu n-tého elementárního rotoru pak platí vztah:

$$I_k^{(n)} = \frac{I_t^{(n)}}{2 \sin \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \pi} \quad (3.23)$$

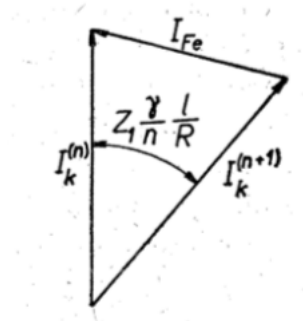
Pro proudy (n+1) elementárního rotoru jsou příslušné vektory I^{n+1} natočeny oproti proudům I^n , jak je znázorněno na obrázku 3.5 níže:



Obrázek 3.5: Fiktivní elementární klec rotoru k výpočtu přídatných ztrát [5]

Fiktivním čelním kruhem protéká proud I_{Fe} , který je dán vektorovým rozdílem proudů $I_k^{(n)}$ a $I_k^{(n+1)}$, jak je naznačeno na vektorovém diagramu na obrázku 3.6 a platí pro něj vztah:

$$I_{Fe} = 2 \cdot I_k \cdot \sin \frac{l}{R} \cdot \frac{Z_1 \cdot \gamma}{2n} \cong I_k \cdot \frac{b \cdot Z_1}{R \cdot n} \quad (3.24)$$



Obrázek 3.6: Vektorový diagram proudu v rotoru [5]

Z rovnice je patrné, že u nezešíkmených drážek je proud v železe nulový. Pro ztráty, které jsou vyvolané proudem v železe na délce A_1A_2 platí vztah:

$$P_{A_1A_2} = I_{Fe}^2 \cdot R_{A_1A_2} \quad (3.25)$$

kde

$R_{A_1A_2}$ je odpor části (A_1A_2) fiktivního čelního kruhu

Úpravou rovnice se dostane celková ztráta v celém fiktivním čelním kruhu n -tého elementárního rotoru:

$$P^{(n)} = Z_2 \cdot P_{A_1A_2} = \frac{(2 \cdot \pi \cdot I_k)^2}{n^2} \cdot \frac{q_{Fe}}{h} \cdot \frac{n}{l} \cdot \pi \cdot D \quad (3.26)$$

a ztráta v celém rotoru je pak dána vztahem:

$$P_S = \sum P^{(n)} = (2 \cdot \pi \cdot I_k)^2 \cdot q_{Fe} \cdot \frac{\pi \cdot D}{h \cdot l} \cdot 10^{-3} \quad (3.27)$$

Jelikož na klec také působí drážkové pole statoru o $(Z_1 + p)$ a $(Z_1 - p)$ pólových dvojicích, bude celková ztráta způsobena působením oběma drážkovými poli:

$$P_{cFe} = 0,145 \cdot I_k^2 \cdot q_{Fe} \cdot \frac{D}{h \cdot l} \cdot 10^{-3} \quad (3.28)$$

kde

h je hloubka vniku.

Dosazením do vztahu za hloubku vniku pro síťový kmitočet a další úpravou pak bude výsledný vztah pro celkové ztráty v železe následovný:

$$P_{cFe} = 1,45 \cdot D \cdot \sqrt{\frac{I_k^3 \cdot Z_1}{p \cdot l}} \cdot 10^{-3} \quad (3.29)$$

Celkové ztráty v tyčích a v železe rotoru u natočených neizolovaných tyčích jsou dány součtem ztrát v tyčích a ztrát v železe:

$$P_{r0} = 0,13 \cdot P_{20} + P_{cFe} \quad (3.30)$$

Při porovnání se se u neizolovaných zešíkmených tyčí zmenší ztráty v samotné kleci, ale přibudou další ztráty způsobené příčnými proudy v železe, tím pádem u celkových ztrát nebude příliš velký rozdíl proti kleci s rovnými tyčemi. [5]

3.4 Přídavné ztráty při zatížení

Kromě ztrát naprázdno a nakrátko se ve stroji vyskytují další ztráty, které jsou závislé na zatížení stroje. Tyto ztráty se nazývají přídavné ztráty při zatížení a určují se měřením jako rozdíl ztrát daných z rozdílu příkonu a výkonu a součtu jednotlivých ztrát naprázdno a nakrátko, jak bylo popsáno v druhé kapitole.

U strojů s kroužkovým rotorem se tato hodnota pohybuje kolem 0,5 % výkonu, ale u strojů s kotvou nakrátko mohou přídavné ztráty dosahovat mnohem vyšších hodnot (1-2 %, ve výjimečných případech až 4-5 %).

Přídavné ztráty při zatížení jsou způsobeny vyššími harmonickými magnetometrické síly, které způsobují povrchové a pulsační ztráty. U strojů s kotvou nakrátko a s rovnými tyčemi vznikají ještě ztráty v kleci a při zešíkmených neizolovaných tyčích přídavné ztráty způsobené proudem tekoucím napříč železem rotoru od jedné tyče ke druhé.

Přesný výpočet těchto ztrát je velmi složitý a u stroje se zešíkmenou klecí kvůli nemožnosti určit příčnou impedanci téměř nemožný. Je to způsobeno tím, že podle měření Odokova se hodnota přechodového odporu mezi tyčí klece a železem rotoru mění až o tři řády.

Výpočet přídavných ztrát při zatížení je odvozen pomocí teoretických úvah a měření. Jejich velikost je úměrná druhé mocnině zatěžovacího proudu a platí pro ně vztah:

$$P_{\Delta Z} = k \cdot (I - I_0)^2 \quad (3.31)$$

Vliv zešíkmení drážek se podle Algera doporučuje respektovat empirickým činitelem, kterým by se násobily ztráty u rotoru z rovných tyčí. [5]

3.4.1 Vliv zešíkmení drážek na přídavné ztráty při zatížení

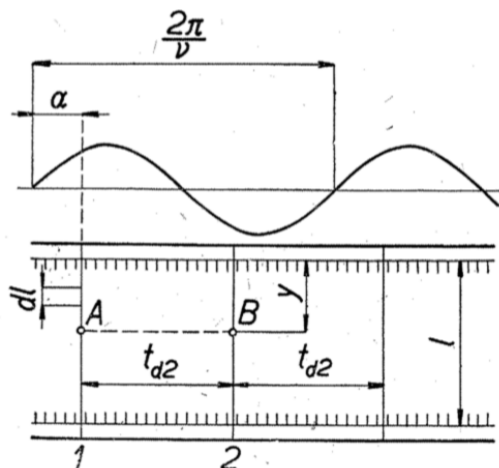
Zešíkmením rotorových drážek o jednu statorovou rozteč se sníží parasitní momenty, které jsou způsobené stupňovými harmonickými a také se téměř odstraní přídavné ztráty v klecové kotvě. Vliv zešíkmení se ovšem uplatní jen při odisolování tyčí proti železu rotoru. U neizolovaných zešíkmených tyčí tečou proudy od jedné tyče k další přes železo rotoru a způsobují ztráty, které jsou těžko zjištělné kvůli neurčitěmu přechodovému odporu mezi tyčemi a železem.

Při výpočtu se nejprve uvažuje neizolovaný rovná klec, pohybující se v magnetickém poli harmonické o určitém řádu a rychlosti, jak je znázorněno na *obrázku 3.7*. V znázorněném případě se v každém elementu tyče indukuje napětí. V elementu n -té tyče je pak indukované napětí definované vztahem:

$$de = B \cdot \sin[\alpha + v(n-1) \cdot t_{d2}] \cdot dl \cdot v \quad (3.32)$$

V celé n -té tyči se indukuje napětí definované vztahem:

$$e_n = B \cdot \sin[\alpha + v(n-1) \cdot t_{d2}] \cdot l \cdot v \quad (3.33)$$



Obrázek 3.7: Příklad výpočtu pro neisolovanou rovnou rotorovou tyč [5]

Pokud můžeme impedanci čelních kruhů zanedbat, dojde ke spotřebě indukovaného napětí v elementu tyče na krytí úbytku v tomto elementu. To znamená, že mezi body A a B na sousedních tyčích 1 a 2, které leží ve stejné vzdálenosti y od kraje rotoru, není žádný potenciální rozdíl, vlivem kterého by mohl protékat příčný proud protékající železem z bodu A do B nebo naopak.

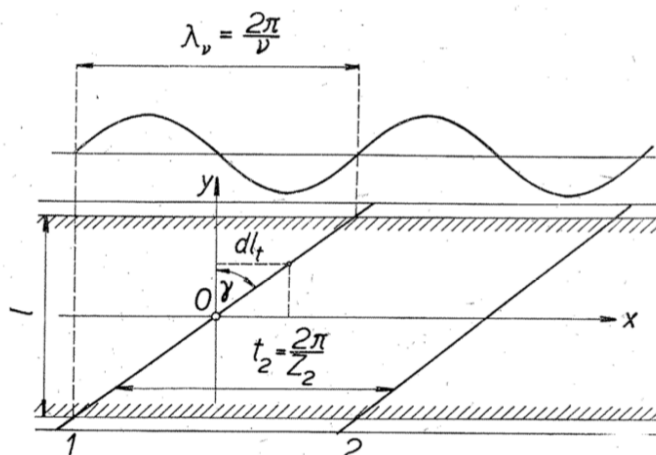
V případě neisolované klece s natočenými tyčemi o vlnovou délku harmonické řádu v , jsou poměry jiné. Indukované napětí v elementu tyče dl_t v místě (x, y) jak je zobrazeno na obrázku 3.8 definované vztahem:

$$de = B \cdot \sin(\alpha + v \cdot y \cdot \tan \gamma) v \cdot dy \quad (3.34)$$

kde γ je úhel zešikmení tyče.

Výsledné indukované napětí e v celé tyči se vypočte pro počátek souřadného systému v 0 a v polovině délky tyče 1. Výsledný vztah má tvar:

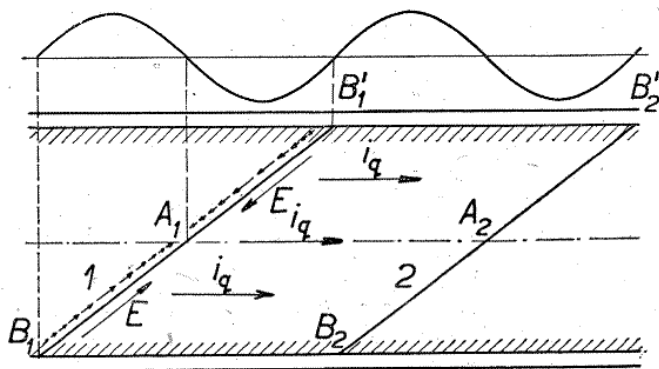
$$e = B \cdot v \int_{-\frac{1}{2}l}^{+\frac{1}{2}l} \sin(\alpha + v \cdot y \cdot \tan \gamma) dy \quad (3.35)$$



Obrázek 3.8: Příklad výpočtu pro neisolovanou zešikmenou rotorovou tyč [5]

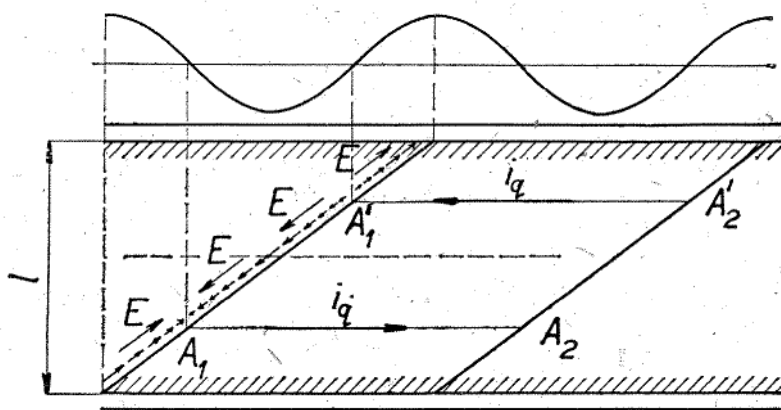
Pokud bude klec natočená o vlnovou délku harmonické řádu v je výsledné napětí indukované tímto polem v celé tyči nulové a nevzniká žádný proud, který by tek l mezi tyčemi a čelními kruhy.

Průběh gradientu napětí podél tyče je indukující pole znázorněno na *obrázku 3.9*, kde je vidět, že celkové napětí mezi body A_1B_1 a $A_1B'_1$ mají stejnou velikost, ale jsou opačného smyslu. Pokud tyče nejsou izolované proti železu, vzniknou dvě smyčky ($A_1B_1B_2A_2$) a ($A_1B'_1B'_2A'_2$), ve kterých jsou stejná napětí opačného smyslu. V obou smyčkách pak vznikají proudy i_q , které tečou z tyče 1 přes železo rotoru do tyče 2 a uzavírají se zpět přes čelní kruhy. [5]



Obrázek 3.9: Průběh gradientů napětí v tyčích a příčných proudů

V poloze indukujícího pole, které je zobrazeno na *obrázku 3.10* se příčné proudy mohou uzavírat železem rotoru ale i čelními kruhy.



Obrázek 3.10: Průběh gradientů napětí v tyčích a příčných proudů

Velmi důležitým parametrem, který má vliv na přídavné ztráty vzniklé příčnými proudy je celkový příčný odpor, který je závislý na délce rotoru l ,

$$R_q = \frac{r_q}{l} \quad (3.36)$$

kde r_q je měrný odpor mezi dvěma tyčemi vztaženými na jednotku délky.

Dále podélný neboli osový odpor jednotlivých tyčí, pro který platí vztah:

$$R_l = r_l \cdot l \quad (3.37)$$

kde r_l měrný odpor tyče na jednotku osově délky stroje l .

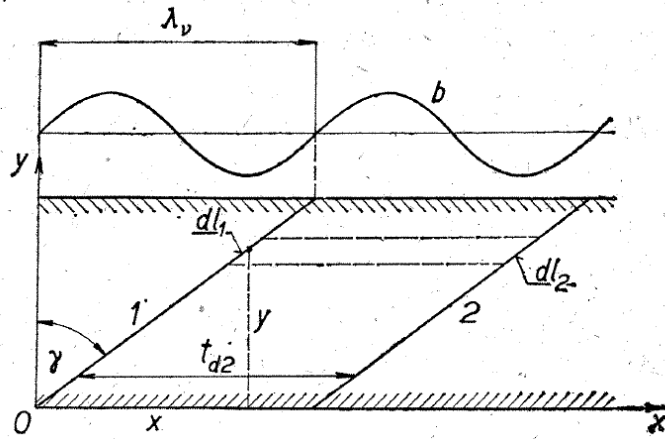
Úpravou těchto vztahů lze vyjádřit, že ztráty od příčných proudů jsou přibližně úměrné vodivosti, tudíž lze napsat:

$$P_{\Delta q} \sim \frac{1}{R_q} = l^2 \quad (3.38)$$

Oproti ostatním ztrátám, které jsou přímo úměrné délce l , přídavné ztráty způsobené příčnými proudy rostou nejméně s druhou mocninou délky stroje. Pro přibližný výpočet přídavných ztrát příčnými proudy je nutné zavést několik zjednodušujících předpokladů:

- Zanedbání impedance železa mezi dvěma tyčemi. Toto zjednodušení je možné provést díky tomu, že přechodný odpor mezi tyčí a železem rotoru, vztažený na jednotku osově délky stroje je mnohem větší než impedance železa mezi dvěma tyčemi.
- Zanedbání impedance čelních kruhů.
- Zanedbání impedance tyčí klece (ve směru osy stroje).

Pro výpočet indukovaného napětí v elementu tyče l o souřadnicích x, y platí rovnice: 3.34. Napětí tohoto elementu o délce dl_1 proti dolnímu okraji rotoru (x) jak je znázorněno na obrázku 3.11 platí vztah:



Obrázek 3.11: Zobrazení veličin k výpočtu přídavných ztrát od příčných proudů [5]

$$e_1 = B \cdot v \int_0^y \sin \cdot (\alpha + v \cdot y \cdot \tan \gamma) dy \quad (3.39)$$

$$e_1 = -\frac{2 \cdot B \cdot v}{v \cdot \tan \gamma} \cdot \sin \left(\alpha + \frac{v \cdot y \cdot \tan \gamma}{2} \right) \cdot \sin \frac{v \cdot y \cdot \tan \gamma}{2} \quad (3.40)$$

Podobný vztah platí pro napětí elementu dl_2 , který má souřadnice $(x + t_{d2}), y$, proti ose x .

$$e_2 = B \cdot v \int_0^y \sin \cdot (\alpha + v \cdot y \cdot \tan \gamma + v \cdot t_{d2}) dy \quad (3.41)$$

$$e_2 = -\frac{2 \cdot B \cdot v}{v \cdot \tan \gamma} \cdot \sin \left(\alpha + \frac{v \cdot y \cdot \tan \gamma}{2} + v \cdot t_{d2} \right) \cdot \sin \frac{v \cdot y \cdot \tan \gamma}{2} \quad (3.42)$$

Rozdíl napětí mezi jednotlivými elementy dl_1 a dl_2 je dán vztahem:

$$\Delta e_{12} = \frac{4 \cdot B \cdot v}{v \cdot \tan \gamma} \cdot \sin \frac{v \cdot y \cdot \tan \gamma}{2} \cdot \sin \frac{v \cdot t_{d2}}{2} \cdot \left(\alpha + \frac{v \cdot y \cdot \tan \gamma}{2} + \frac{v \cdot t_{d2}}{2} \right) \quad (3.43)$$

Pro proud tekoucí mezi elementy dl_1 a dl_2 při napětí Δe_{12} je platí rovnice:

$$di_q = \frac{\Delta e_{12}}{r_q} dy \quad (3.44)$$

kde r_q je přechodový odpor mezi tyčí a železem vztažený na jednotku osové délky stroje.[5]

Po bližším rozboru se ukazuje, že reakce příčných proudů je zanedbatelná. Z toho vyplývá, že rovnice (3.44) dobře vystihuje skutečné poměry ve stroji. Ztráty v přechodovém odporu na jednotlivých elementech dl_1 a dl_2 , se vypočtou z rovnice:

$$dP_{\Delta q} = 2 \cdot (di_q)^2 \frac{r_q}{dy} \quad (3.45)$$

Celkové ztráty v jedné drážkové rozteči po integraci a úpravě se vypočtou:

$$P_{\Delta q} \cong 8 \cdot B^2 \cdot v^2 \cdot \frac{\sin^2 \frac{v \cdot t_{d2}}{2}}{r_q \cdot v^2 \cdot \tan^2 \gamma} \cdot l \quad (3.46)$$

Při zešíkmení tyčí o jednu statorovou drážkovou rozteč se ztráty způsobené příčnými proudy vypočtou podle rovnice:

$$P_{\Delta q} \cong 8 \cdot B^2 \cdot v^2 \cdot \frac{\sin^2 \frac{Z_1 \cdot \pi}{Z_2}}{r_q \cdot Z_2^2 \cdot t_{d1}^2} \cdot l^3 = 8 \cdot B^2 \cdot v^2 \cdot \frac{\sin^2 \frac{Z_1 \cdot \pi}{Z_2}}{r_q \cdot (\pi \cdot D)^2} \cdot l^3 \quad (3.47)$$

Specifické ztráty na jednotku osové délky stroje se vypočtou:

$$P'_{\Delta q} = 8 \cdot B^2 \cdot v^2 \cdot \frac{\sin^2 \frac{Z_1 \cdot \pi}{Z_2}}{r_q \cdot \pi^2} \cdot \left(\frac{l}{D} \right)^2 \quad (3.48)$$

Z předchozích vztahů a provedených teoretických úvah je možné odvodit tyto body, které se týkají zešíkmení tyčí:

- Pro stroje s polouzavřenými drážkami na statoru je doporučeno použít rotor s rovnými drážkami a izolování tyčí klece rotoru je zbytečné.
- Pro stroje s otevřenými drážkami na statoru a stroje s poměrem $D/l < 1$ je doporučeno použít klecový rotor s drážkami, které jsou natočené o jednu statorovou rozteč a zároveň použít plně izolované tyče proti železu rotoru.
- Pro stroje s natočenými drážkami je vhodné použít statorové vinutí dvouvrstvové se zkráceným krokem. [5]

4 Způsoby snížení dodatečných ztrát

4.1 Návrh velikosti vzduchové mezery

Správně zvolená velikost vzduchové mezery může kladně ovlivnit energetické ukazatele asynchronního motoru. Při zmenšení vzduchové mezery dochází k zmenšení magnetického odporu a magnetického napětí, které tvoří magnetomotorické napětí magnetického obvodu stroje. To způsobí zmenšení magnetizačního proudu motoru, což vede k zvětšení účinníku stroje a zmenšení ztrát ve vinutí statoru. Pokud dojde k nadměrnému zmenšení vzduchové mezery, může dojít k nárůstu povrchových a pulsních ztrát, což v konečném důsledku může výslednou účinnost místo navýšení snížit.

Při navrhování stroje se vzduchová mezera volí s ohledem na co nejnižší ztráty. Zvětšováním vzduchové mezery se sice snižují pulsní ztráty, ale rostou ztráty ve statorovém vinutí. Musí se tedy provést výpočet, který stanoví ideální poměr mezi těmito parametry. Výpočet se v praxi provádí na počítačích, ale je možné stanovit vzduchovou mezeru i pomocí empirických vzorců.

Výpočty se odlišují podle výkonu a závisí na počtu pólů a vnitřním průměru statoru. Pro motory do 20 kW a pro $2p = 2$ se vzduchová mezera vypočte podle vztahu:

$$\delta \approx (0,3 + 1,5D)10^{-3} \quad (4.1)$$

kde D je vnitřní průměr statoru asynchronního motoru.

Pro motory $2p \geq 4$ je výpočet pro vzduchovou mezeru:

$$\delta \approx (0,25 + 1,5D)10^{-3} \quad (4.2)$$

Motory středních a velkých výkonů mají výpočet pro vzduchovou mezeru ze vztahu:

$$\delta \approx \frac{D}{1,2} \left(1 + \frac{9}{2p} \right) 10^{-3} \quad (4.3)$$

Povrchové a pulsační ztráty jsou závislé na amplitudě a frekvenci pulsační indukce ve vzduchové mezeře. Z toho vyplývá, že u rychloběžných motorů se volí větší vzduchová mezera, čímž se zmenší amplituda pulsační indukce.

Další důvod zvětšení vzduchové mezery je u velkých motorů na vysoké napětí, kde se používají otevřené drážky na statoru, které způsobují velké pulsace indukce. [1]

4.2 Výpočet počtu drážek rotoru

Správná volba počtu drážek v rotoru má velký vliv na přídavné pulsační ztráty, rušení vlivem asynchronních a synchronních momentů a vibrací, bránící správného provozu asynchronního motoru. Je to způsobeno tím, že pole vzduchové mezery stroje obsahuje kromě základní harmonické i vyšší harmonické, vlivem kterých se indukuje v rotorovém vinutí proud v tyčích vinutí. Vzájemným působením proudů a polí vyšších harmonických pak vznikají elektromagnetické momenty. V konečném důsledku to může mít vliv nejen na přídavné ztráty, ale také na momentovou charakteristiku tzv. „sedla“ v momentové charakteristice. [1]

Tyto problémy řeší několik základních rovnic, které by se při návrhu poměru statorových a rotorových drážek měly dodržovat.

$$Q_r < 1,25 \cdot Q_s \quad (4.4)$$

kde Q_r je počet drážek rotoru,

Q_s je počet drážek statoru.

Dále pouze pro třífázové stroje k omezení synchronních momentů ve stavu, kdy je motor v klidu musí platit pro drážky rotoru:

$$Q_r \neq 6 \cdot p \cdot g \quad (4.5)$$

kde g by mělo být jakékoliv kladné číslo

Aby nedocházelo k synchronním momentům, které jsou způsobené drážkovými harmonickými je nutné dodržovat tyto podmínky:

$$Q_r \neq Q_s \pm 2p \quad (4.6)$$

$$Q_r \neq \frac{1}{2} Q_s \pm 2p \quad (4.7)$$

$$Q_r \neq Q_s \pm p \quad (4.8)$$

$$Q_r \neq 2Q_s \pm 2p \quad (4.9)$$

Omezení synchronních momentů během běhu stroje se docílí následující nerovností:

$$Q_r \neq 6 \cdot p \cdot g \pm 2p \quad (4.10)$$

Znaménko plus se používá pro kladné otáčky a mínus pro otáčky záporné.

Výše uvedené počty drážek jsou určena pouze, když nedochází k žádnému zešíkmení rotoru. Pokud jsou drážky zešíkmené vůči statoru, tak harmonické momenty a vibrace jsou více nebo méně oslabeny. Pro výběr počtu drážek rotoru platí následující vztah, který závisí na počtu drážek na pól a fázi q_s statoru a počtu pólových párů p , když rotorové tyče jsou zešíkmeny o jednu statorovou rozteč. [2]

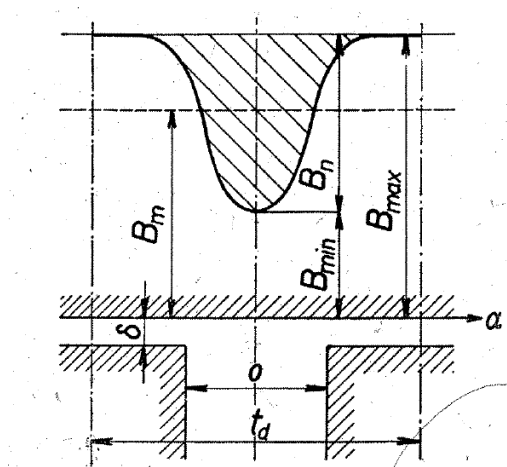
$$Q_r = (6 \cdot q_s + 4)p = Q_s + 4p \quad (4.11)$$

4.3 Úprava otevření statorové drážky

Otevření statorové drážky značně ovlivňuje průběh magnetického toku ve vzduchové mezeře. Zvětšením otevření statorové drážky se zvýší Jouleovy ztráty ve statorovém vinutí a také přídavné ztráty naprázdno. Tento stav zohledňuje tzv. Carterův činitel, který respektuje poměry ve skutečném stroji.

Je definován jako poměr mezi velikostí indukce bez přítomnosti drážkování, kde pole indukce je sinusové s amplitudou B_{max} a hodnotou magnetické indukce, při stejné magnetomotorické síle v ose drážky B_{min} .

$$K_c = \frac{B_{max}}{B_{min}} \quad (4.12)$$



Obrázek 4.1: Průběh magnetické indukce nad drážkou [5]

Velikost otevření statorové drážky je omezena technologickými postupy a řešením navíjení statorového vinutí, jelikož velké zúžení drážky by znemožnilo vložení vinutí do drážky. Jak je vidět na předešlém obrázku, tak v ideálním případě by měla být drážka plně uzavřena, aby rozdíl mezi indukce byl nulový. Nejblíže se tomuto řešení lze přiblížit použitím magneticky vodivých klínů, které by měly pozitivní vliv na průběh indukce a došlo by k snížení přídavných ztrát naprázdno. [3] [5]

4.4 Odtržení rotorové klece

Snížování dodatečných ztrát pomocí odtržení rotorové klece je oproti ostatním způsobům odlišné. Tento způsob nevyžaduje žádné technologické úpravy stroje ani změnu technologie výroby jednotlivých komponentů asynchronního motoru, tudíž nezvyšuje náklady ani cenu stroje. Tento faktor může mnohdy ovlivnit, zda se daná metoda využije či nikoliv.

Princip této metody spočívá v tom, že při odtrhávání rotorové klece nastává uvnitř rotoru teplotní šok, který u hliníkové klece způsobí oxidaci hliníku a vznikne tak tenká vrstva oxidu hlinitého (Al_2O_3) na jeho povrchu. Tím se zvýší přechodný odpor mezi klecí a rotorovým paketem a dojde k částečnému izolování klece vůči paketu. Vyšší přechodný odpor následně sníží velikost příčných proudů, které tečou mezi jednotlivými tyčemi přes železo rotoru a tím dojde ke snížení přídavných ztrát.

Zásadní vliv na velikost přídavných ztrát příčnými proudy mají rozměry rotoru (poměr průměru k délce rotorového paketu) a velikost impedance kruhů nakrátko. Poměry impedancí určují, jak velké proudy obvodem potečou a kudy se budou v obvodu uzavírat. To poté určuje, jestli odtržení rotorové klece bude mít v daném případě opodstatnění.

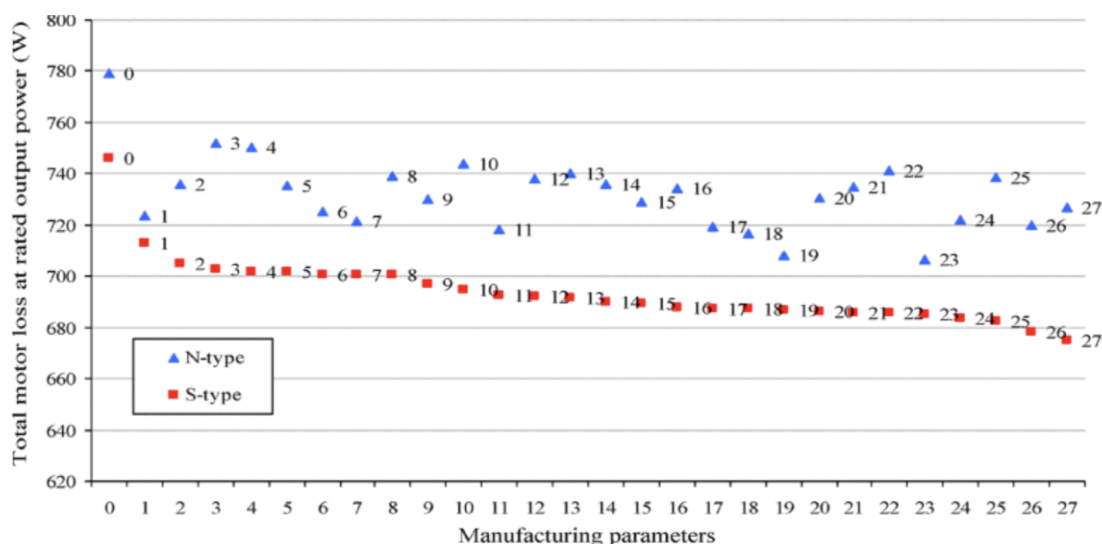
Odtržení rotorové klece je možné k navýšení účinků provádět vícekrát. Většinou se provádí 3 odtrhy, ovšem je možné provést i více, pokud se bude efekt stále projevovat. Jelikož pro tento stav není motor konstruován, může opakované odtrhávání klece mít i negativní vlivy na parametry motoru.

Hlavní ukazatel je zhoršení asymetrie, které při měření může způsobit větší vibrace nebo vyšší hladinu akustického tlaku. [7]

4.4.1 Izolování klece

Klec rotoru asynchronních motorů nebývá obvykle izolována od železa rotoru. V důsledku toho mohou téct proudy od tyče k tyči přes železo rotoru, jak bylo popsáno v třetí kapitole. Rozsah, ve kterém k tomu dochází závisí na řadě konstrukčních faktorů, zejména na účinném kontaktním odporu tyče a železa. U tlakově litých rotorů je konečný kontaktní odpor zajištěn tenkou vrstvou oxidu hlinitého, který se vytvoří mezi železem a roztaveným kovem. [6]

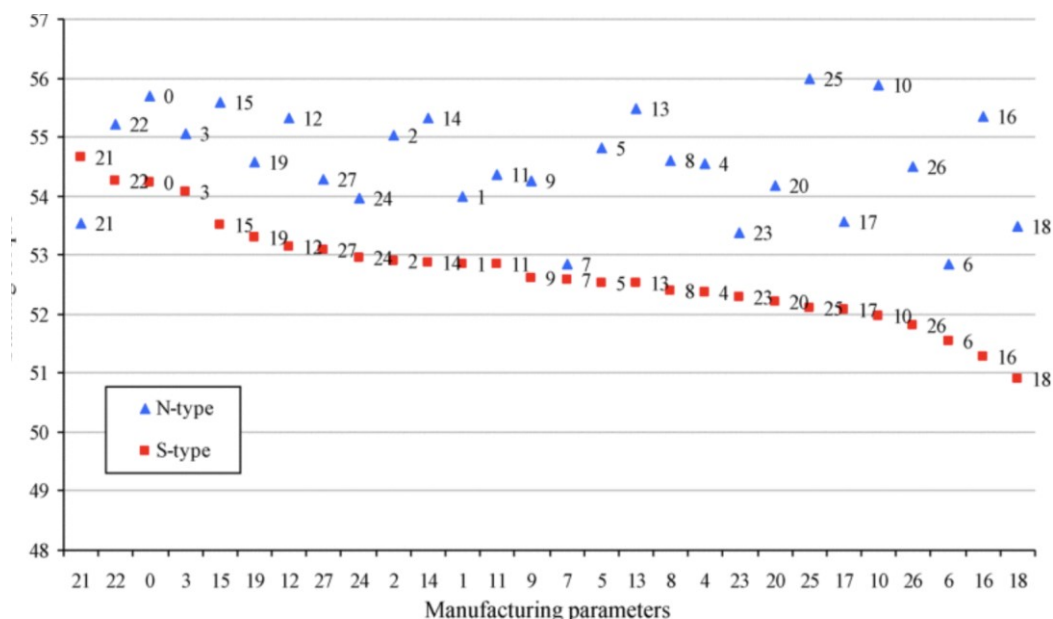
Při zkoumání vlivu izolace mezi tyčí a železem rotoru je vytvořeno několik experimentálních výzkumů. V následující analýze je na *obrázku 4.2* zobrazeno 28 rotorů stejné konstrukce, přičemž referenčním písmenem „N“ jsou označeny motory s nižším stupněm izolace a písmenem „S“ jsou označeny motory s vyšším stupněm izolace. U Rotorů se stejným číslem (S22 a N22) je tedy jediný rozdíl v procesu používaného k izolování tyče. U rotorů se stejným písmenem (S8 a S22) jsou tyče izolovány stejným způsobem, ale jsou zde jiné výrobní parametry, jako je teplota atd....



Obrázek 4.2: Naměřené ztráty v motoru při použití různého stupně izolace rotoru [9]

Z naměřených hodnot zobrazených na obrázku *obr. 4.2* je vidět, že existuje určitý systematický rozdíl mezi „S“ typem a „N“ typem izolace klece. Poukazuje to na významné snížení ztrát v motoru vlivem zvýšení izolace klece rotoru.

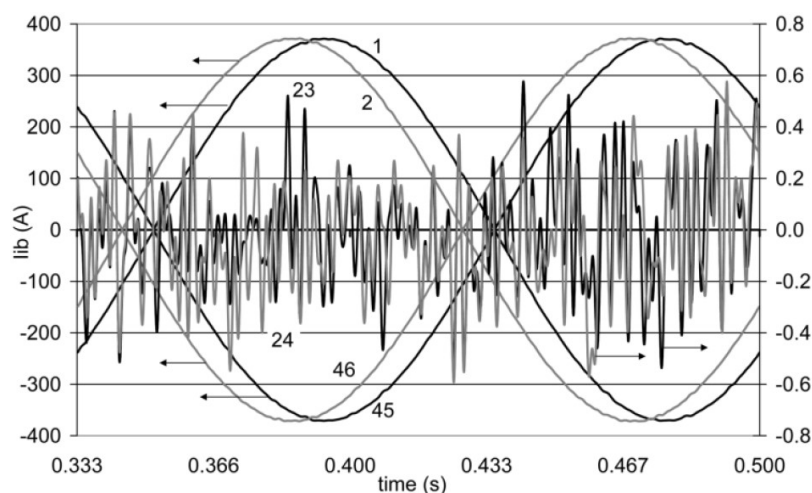
Dále bylo zjištěno, že příčné tyčové proudy mohou ovlivnit také záběrný moment stroje. Je prokázáno, že zlepšení izolace rotorových tyčí ve skutečnosti sníží skutečný odpor klece, a tím klesne i záběrný moment stroje, což je pro stroj velmi kontraproduktivní. Na *obrázku 4.3* níže je vidět, jak je u vyššího stupně izolace tyčí záběrný moment u téměř všech vzorků menší než u izolace nižšího stupně. [9]



Obrázek 4.3: Vliv stupně izolování tyčí na záběrný moment motoru [9]

U rotoru s rovnými nezešíkmenými tyčemi nejsou příčné proudy vyloučeny. Podle teoretického rozboru ve 3. kapitole, který pojednává o příčných proudech pouze u zešíkmených tyčí je totiž zmíněna podmínka nulové impedance kruhů nakrátko, která v praxi není dosažitelná.

V praxi tedy impedance kruhů nakrátko není nulová, ale její hodnota je nízká, takže i hodnoty příčných proudů mezi tyčemi jsou nepatrné. Na obrázku 4.4 níže je zobrazeno měření rotoru nezešíkmených tyčí, kde je vidět, jak velké příčné proudy mezi tyčemi tekly v porovnání s jmenovitým napájecím proudem. [11]



Obrázek 4.4: Příčné proudy u nezešíkmených drážek rotoru [11]

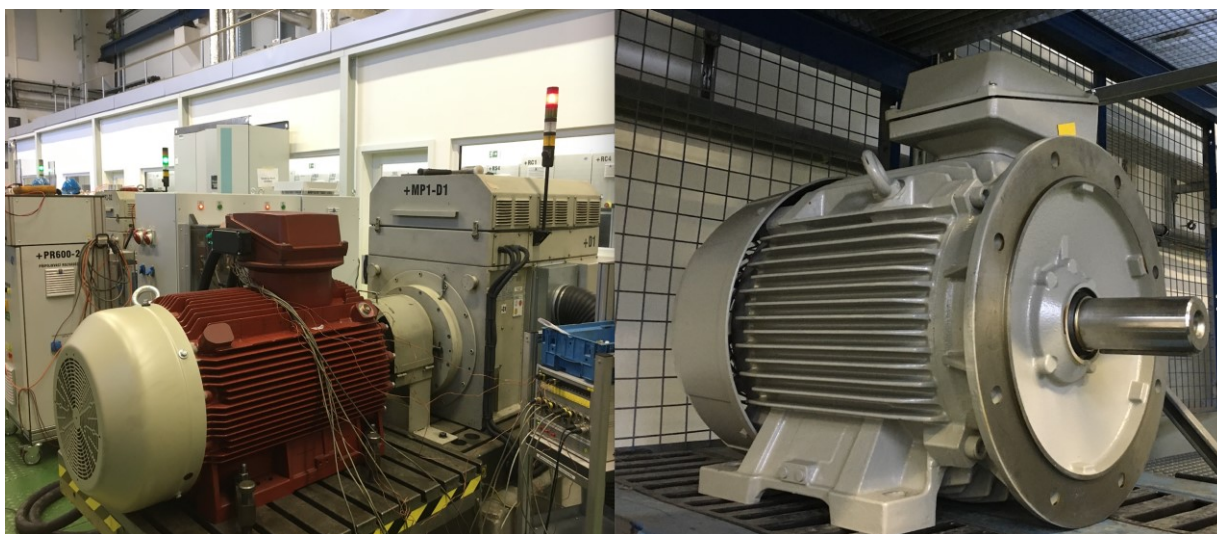
4.4.2 Postup provedení odtrhů

Odtrh rotorové klece je technicky jednoduchá záležitost, ale musí být dodrženy některé důležité podmínky. Postup provedení jednoho odtrhu je následující:

1. Nejprve se provede blokace rotoru.
2. Nastaví se jmenovité napětí na svorky motoru. Každý motor má dle technických parametrů stanovenou dobu, jak dlouho může při jmenovitém napětí ve stavu nakrátko zůstat (přibližně 20 sekund).
3. Poté se motor nechá vychladnout na teplotu okolí, přičemž se hlídá převážně teplota rotoru a postup se může opakovat.

5 Měření vlivu odtržení rotorové klece

Měření bylo provedeno na čtyřech různých vzorcích asynchronních motorů různých výkonů a parametrů. Jmenovité výkony byly 37 kW, 45 kW, 82,8 kW a 250 kW. Na každém motoru byla provedena typová zkouška před odtržením rotorové klece a poté se prováděly postupně čtyři odtrhy, přičemž po každém se dělalo opětovné přeměření parametrů motoru. Na *obrázku 5.1* je na levé straně zobrazen zkoušený asynchronní motor připojen k zatěžovateli a na pravé straně vzorek zkoumaného motoru ze zkušebny.



Obrázek 5.1: Zkouška asynchronního motoru (vlevo), vzorek zkoušeného motoru (vpravo)

Zkoušky se nastavovaly přes naprogramované virtuální panely ovládání, které urychlují průběh zkoušek a zlepšují přesnost a bezpečnost měření. Naměřené hodnoty se spolu s grafy z databáze exportují do protokolů. Panel virtuální instrumentace je zobrazen na *obrázku 5.2*, který byl vyfocen při zkoušce jednoho z motorů.



Obrázek 5.2: Virtuální panel sloužící k ovládání pracoviště

5.1 Měření na motoru s jmenovitým výkonem $P_n = 37 \text{ kW}$

Asynchronní motor o osové výšce 225 mm s těmito štítkovými údaji a základními rozměry:

Tabulka 5.1: Štítkové údaje motoru $P_n=37 \text{ kW}$

P_n (kW)	U_n (V)	I_n (A)	$\cos \varphi_n$ (-)	n_n (ot/min)	η (%)
37	415	64	0,86	1478	94,07

Tabulka 5.2: Základní rozměry motoru $P_n=37 \text{ kW}$

	Stator	Rotor
Počet drážek (-)	48	40
Vnitřní průměr (mm)	235	232,8
Délka paketu (mm)	230	230
Drážková rozteč (mm)	18,3	15,4

Jednalo se o motor s rotorem ze zešíkmenými drážkami o $3,88^\circ$ a byl použit rotor s mezikruhem (tzv. šípový rotor). Zešíkmení drážek u takového rotoru není provedeno po celé délce paketu rotoru ve stejném směru, ale pouze do poloviny paketu. Uprostřed paketu je mezikruh a celý paket je pomyslně rozdělen na dvě části.

Tabulka 5.3: Vybrané naměřené hodnoty při jednotlivých odtržích

Veličiny	jednotky	bez odtrhu	1 odtrh	2 odtrh	3 odtrh	4 odtrh
Elektrické						
Ztráty v železe	W	376,7	374,8	400,9	388,9	379,5
Ztráty třením a ventilací	W	140,7	136,7	127,8	114,6	117,5
Dodatečné ztráty při zatížení	W	250,5	241,8	280,2	259,9	264,8
ztráty ve vinutí statoru	W	1021	1015	1014	1015	1018
ztráty ve vinutí rotoru	W	542,7	539,6	541,6	541,4	542
účinník	-	0,837	0,837	0,838	0,837	0,837
účinnost	%	94,07	94,13	93,99	94,1	94,1
Poměrné hodnoty						
Záběrný moment	-	2,46	2,45	2,44	2,44	2,44
Záběrný proud	-	6,97	6,98	6,95	7,07	6,96
Maximální moment	-	2,6	2,6	2,59	2,61	2,61
Mechanické						
Hladina akustického tlaku při zatížení	dB	62,4	62,7	65,9	63,8	67,8
Hladina akustického tlaku bez zatížení	dB	55,7	55,8	57,6	56	56,9
Vibrace	μm	1,446	1,382	0,89	1,09	0,94
Vibrace pevná montáž	μm	0,35	0,394	0,336	0,282	0,354

V tabulce naměřených hodnot *tab. 5.3* na vzorku motoru s jmenovitým výkonem $P_n = 37$ kW jsou barevně označené parametry, které byly ovlivněny odtrháváním rotorové klece. Zelená barva vyznačuje zlepšení parametrů a červená jejich zhoršení. Z naměřených hodnot je vidět, že ke snížení přídavných ztrát nedošlo. Naopak došlo k mírnému zvýšení o 14,3 W po čtvrtém odtržení rotoru. Zhoršení bylo také u hladiny akustického tlaku při zatížení, kde se hodnota zvýšila o 5,4 dB. Zlepšení parametrů nastalo u ztrát třením a ventilací, přičemž se hodnota snížila o 23,2 W. Dále se snížila hodnota vibrací o 0,506 μm. Vzhledem k naměřeným hodnotám neměla zkouška odtržením rotorové klece zásadní pozitivní vliv na parametry motoru.

5.2 Měření na motoru s jmenovitým výkonem $P_n = 45 \text{ kW}$

Asynchronní motor o osové výšce 225 mm s těmito štítkovými údaji a základními rozměry:

Tabulka 5.4: Štítkové údaje motoru $P_n=45 \text{ kW}$

P_n (kW)	U_n (V)	I_n (A)	$\cos \varphi_n$ (-)	n_n (ot/min)	η (%)
45	380	84	0,86	1478	94,2

Tabulka 5.5: Základní rozměry motoru $P_n=45 \text{ kW}$

	Stator	Rotor
Počet drážek (-)	48	40
Vnitřní průměr (mm)	235	232,8
Délka paketu (mm)	290	290
Drážková rozteč (mm)	15,3	18,3

Jednalo se o motor s rotorem ze zešíkmenými drážkami o $3,067^\circ$ a byl použit rotor s mezikruhem (tzv. šípový rotor). Zešíkmení drážek u takového rotoru není provedeno po celé délce paketu rotoru ve stejném směru, ale pouze do poloviny paketu. Uprostřed paketu je mezikruh a celý paket je pomyslně rozdělen na dvě části.

Tabulka 5.6: Vybrané naměřené hodnoty při jednotlivých odtržích

Veličiny	jednotky	bez odtrhu	1 odtrh	2 odtrh	3 odtrh	4 odtrh
Elektrické						
Ztráty v železe	W	365,4	381,7	386	380,6	376,7
Ztráty třením a ventilací	W	168,9	146,6	133,5	124	133,6
Dodatečné ztráty při zatížení	W	401,3	380,2	368,0	373,0	363,3
ztráty ve vinutí statoru	W	1131	1132	1127	1130	1125,8
ztráty ve vinutí rotoru	W	701,8	704,9	698,2	701,9	697,4
účinník	-	0,854	0,853	0,853	0,853	0,853
účinnost	%	94,2	94,2	94,31	94,32	94,35
Poměrné hodnoty						
Záběrný moment	-	2,67	2,64	2,64	2,66	2,64
Záběrný proud	-	7,11	7,08	7,0	7,17	7,05

Maximální moment	-	2,61	2,62	2,62	2,6	2,62
Mechanické						
Hladina akustického tlaku při zatížení	dB	66,2	66,1	66,9	67,1	66,0
Hladina akustického tlaku bez zatížení	dB	62,9	60,9	61,9	63	59,2
Vibrace	μm	1,78	1,8	2,09	2,26	2,59
Vibrace pevná montáž	μm	0,198	0,542	0,464	0,408	0,46

Z tabulky naměřených hodnot *tab. 5.6* na vzorku motoru s jmenovitým výkonem $P_n = 45 \text{ kW}$ je vidět na zeleně zvýrazněných hodnotách zlepšení parametrů a červeně zvýrazněných hodnotách jejich zhoršení po jednotlivých odtržích. Přidavné ztráty při zatížení klesly po 4. odtrhu z původních 401,3 W na 363,3 W, tedy o 38 W. Také se zlepšila účinnost o 0,15 % a mírně se snížil záběrný proud. Jak je možné vidět červeně označenými hodnotami, tak došlo také ke zhoršení vlastností stroje, kdy se hodnoty vibrací značně zvětšily, a to u obou měření o více než dvojnásobnou hodnotu. Při měření tohoto vzorku motoru došlo ke všem teoreticky možným zlepšení parametrů motoru, ale také se projevíly negativní vlivy provedení odtržení rotorové klece.

5.3 Měření na motoru s jmenovitým výkonem $P_n = 82,8 \text{ kW}$

Asynchronní motor o osově výšce 280 mm s těmito štítkovými údaji a základními rozměry:

Tabulka 5.7: Štítkové údaje motoru $P_n=82,8 \text{ kW}$

P_n (kW)	U_n (V)	I_n (A)	$\cos \varphi_n$ (-)	n_n (ot/min)	η (%)
82,8	415	135	0,9	2978	94,9

Tabulka 5.8 Základní rozměry motoru $P_n=82,8 \text{ kW}$

	Stator	Rotor
Počet drážek (-)	36	28
Vnitřní průměr (mm)	265	261,8
Délka paketu (mm)	270	270
Drážková rozteč (mm)	23,1	29,4

U tohoto vzorku motoru nebylo provedeno zešíkmení rotorových tyčí.

Tabulka 5.9: Vybrané naměřené hodnoty při jednotlivých odtržích

Veličiny	jednotky	bez odtrhu	1 odtrh	2 odtrh	3 odtrh	4 odtrh
Elektrické						
Ztráty v železe	W	831,4	824,9	841	848,3	835,4
Ztráty třením a ventilací	W	870,7	945,3	864,8	840,6	1068
Dodatečné ztráty při zatížení	W	768,7	637	629,7	574,4	668,4
ztráty ve vinutí statoru	W	1153	1141	1139	1131	1149
ztráty ve vinutí rotoru	W	624,9	625,7	620,8	616	629,3
účinník	-	0,892	0,895	0,894	0,894	0,894
účinnost	%	95,12	95,2	95,29	95,38	95,01
Poměrné hodnoty						
Záběrný moment	-	3,05	2,79	2,89	2,82	2,85
Záběrný proud	-	8,2	8,39	8,43	8,42	8,5
Maximální moment	-	3,11	3,23	3,24	3,24	3,24
Mechanické						
Hladina akustického tlaku při zatížení	dB	74,4	75,0	74,8	74,8	75
Hladina akustického tlaku bez zatížení	dB	73,7	73,9	73,7	73,9	73,8
Vibrace	μm	1,962	2,538	3,056	3,388	3,384
Vibrace pevná montáž	μm	0,876	0,962	1,102	1,077	0,96

Z tabulky naměřených hodnot *tab. 5.9* na vzorku motoru s jmenovitým výkonem $P_n = 82,8$ kW je vidět na tučně vyznačených hodnotách, kde došlo k výraznějším změnám. Zelené označení znamená zlepšení parametrů a červené označení jejich zhoršení. Došlo ke snížení přídatných ztrát při zatížení po 4. odtržení klece o 100,3 W. Účinnost se zvýšila pouze po 3. odtržení, poté vlivem velkého zvýšení ztrát třením a ventilací klesla ještě o jednu desetinu než před jednotlivých odtržích. Zhoršení nastalo zvýšením záběrného proudu a snížením záběrného momentu, tedy i jejich poměrným hodnotám. Zvýšila se také průměrná hodnota vibrací o 1,422 μm. Z naměřených hodnot lze tedy říct, že pozitivní účinek na přídatné ztráty byl dosažen, ovšem hodnota účinnosti se po čtyřech odtržích nevyšla oproti původní hodnotě.

5.4 Měření na motoru s jmenovitým výkonem $P_n = 250 \text{ kW}$

Asynchronní motor o osové výšce 315 mm s těmito štítkovými údaji a základními rozměry:

Tabulka 5.10: Štítkové údaje motoru $P_n=250 \text{ kW}$

P_n (kW)	U_n (V)	I_n (A)	$\cos \varphi_n$ (-)	n_n (ot/min)	η (%)
250	400	430	0,88	2986	95,8

Tabulka 5.11: Základní rozměry motoru $P_n=250 \text{ kW}$

	Stator	Rotor
Počet drážek (-)	48	40
Vnitřní průměr (mm)	315	309,6
Délka paketu (mm)	450	446
Drážková rozteč (mm)	20,6	24,3

U tohoto vzorku motoru nebylo provedeno zešíkmení rotorových tyčí.

Tabulka 5.12: Vybrané naměřené hodnoty při jednotlivých odtržích

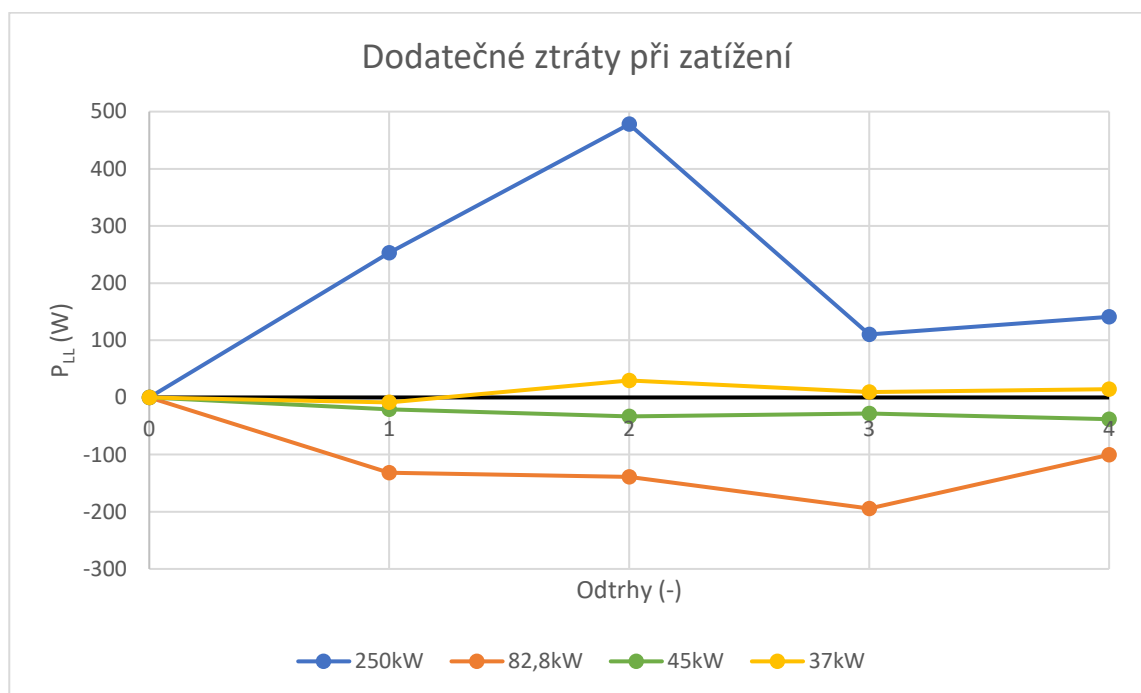
Veličiny	jednotky	bez odtrhu	1 odtrh	2 odtrh	3 odtrh	4 odtrh
Elektrické						
Ztráty v železe	W	2653	2685	2665	2787	2708
Ztráty třením a ventilací	W	1482	1612	1506	1477	1553
Dodatečné ztráty při zatížení	W	761,1	1014	1239	871,4	902
ztráty ve vinutí statoru	W	1925	1931	1928	1909	1920
ztráty ve vinutí rotoru	W	1095	1106	1109	1101	1110
účinník	-	0,877	0,879	0,879	0,879	0,879
účinnost	%	96,93	96,77	96,73	96,88	96,83
Poměrné hodnoty						
Záběrný moment	-	3,34	3,36	3,34	3,27	3,35
Záběrný proud	-	10,31	10,37	10,29	10,21	10,31
Maximální moment	-	4,26	4,01	4,1	4,09	4,09
Mechanické						
Hladina akustického tlaku při zatížení	dB	78,4	78,2	78,6	78,9	79,1

Hladina akustického tlaku bez zatížení	dB	78,1	78,1	78,5	78,7	78,8
Vibrace	μm	0,786	1,828	1,76	1,728	1,794
Vibrace pevná montáž	μm	1,096	1,01	0,986	0,632	0,988

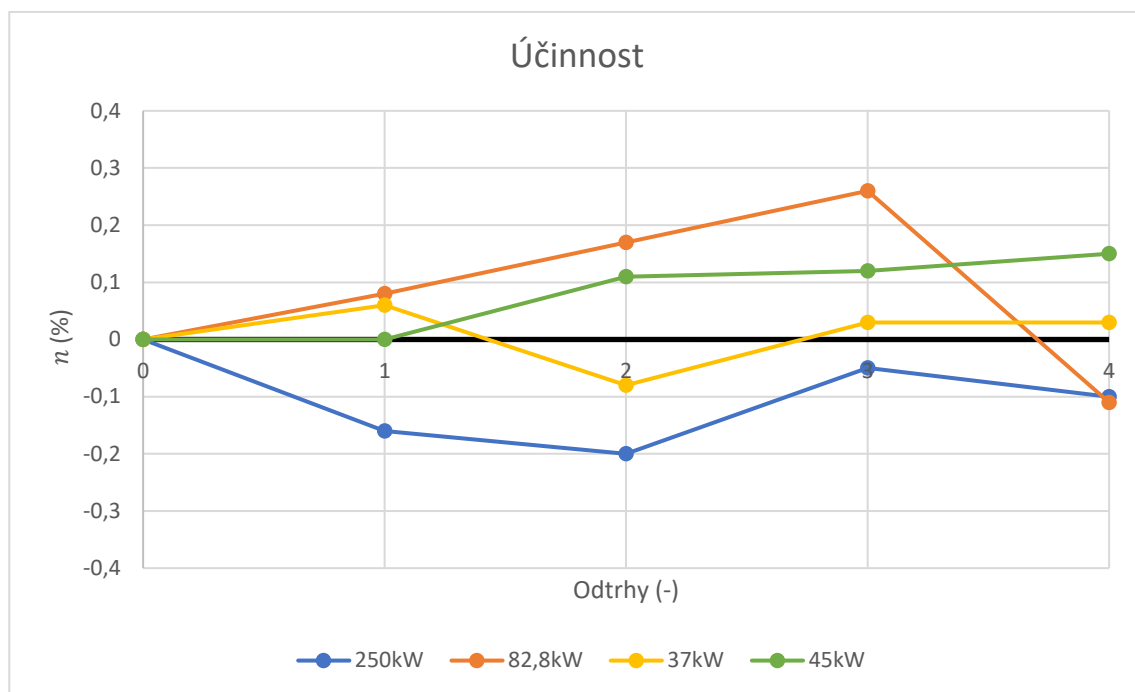
V tabulce naměřených hodnot *tab. 5.9* na vzorku motoru s jmenovitým výkonem $P_n = 250$ kW jsou barevně označené parametry, které byly ovlivněny odtrháváním rotorové klece. Zelená barva vyznačuje zlepšení parametrů a červená jejich zhoršení. Z naměřených hodnot je vidět, že po jednotlivých odtržení rotorové klece přídatné ztráty narůstaly, což neodpovídá teoretickým předpokladům. Další zhoršení bylo u průměrných vibrací stroje, kdy vibrace vzrostly o 1,008 μm. U měření vibrací s pevnou montáží stroje se ale tyto hodnoty nezvýšily. Na ostatní veličiny neměly jednotlivé odtržení rotorové klece zásadní vliv.

5.5 Vyhodnocení naměřených výsledků

V této části byly do grafů sjednoceny testované motory a je zde porovnáno, jak se měnily jejich parametry po odtržení rotorové klece. Dále je vytvořena tabulka, která porovnává změny přídatných ztrát a účinnosti vztažené k rozměrům rotoru.

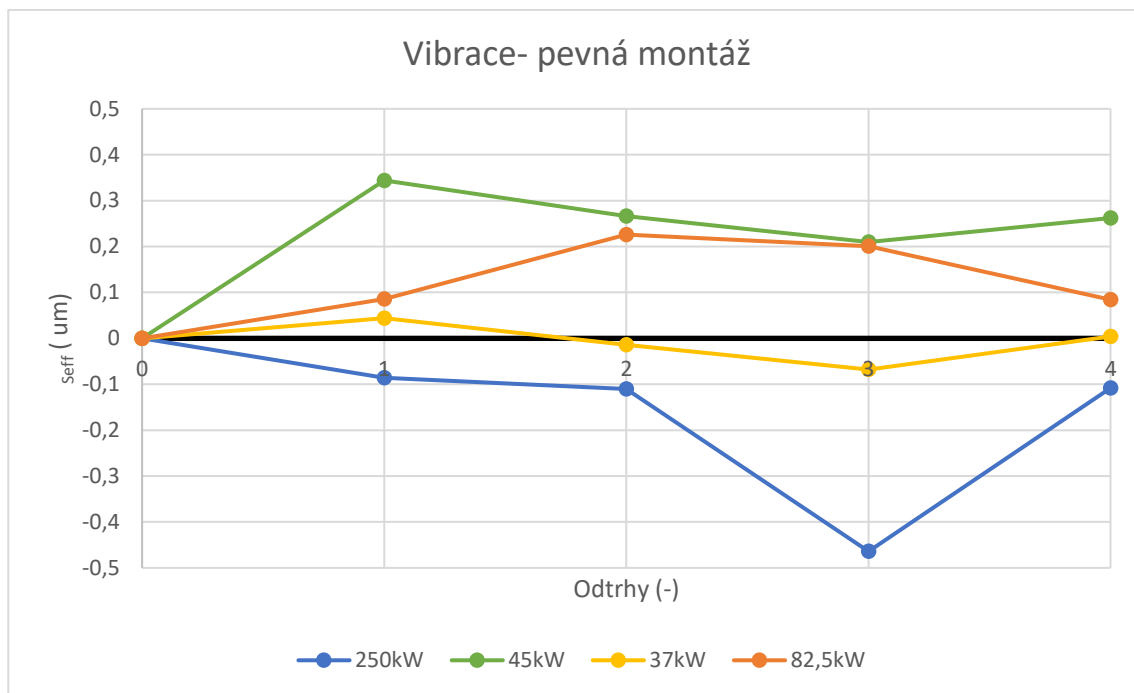


Obrázek 5.3: Průběh změny dodatečných ztrát při zatížení po jednotlivých odtrženích

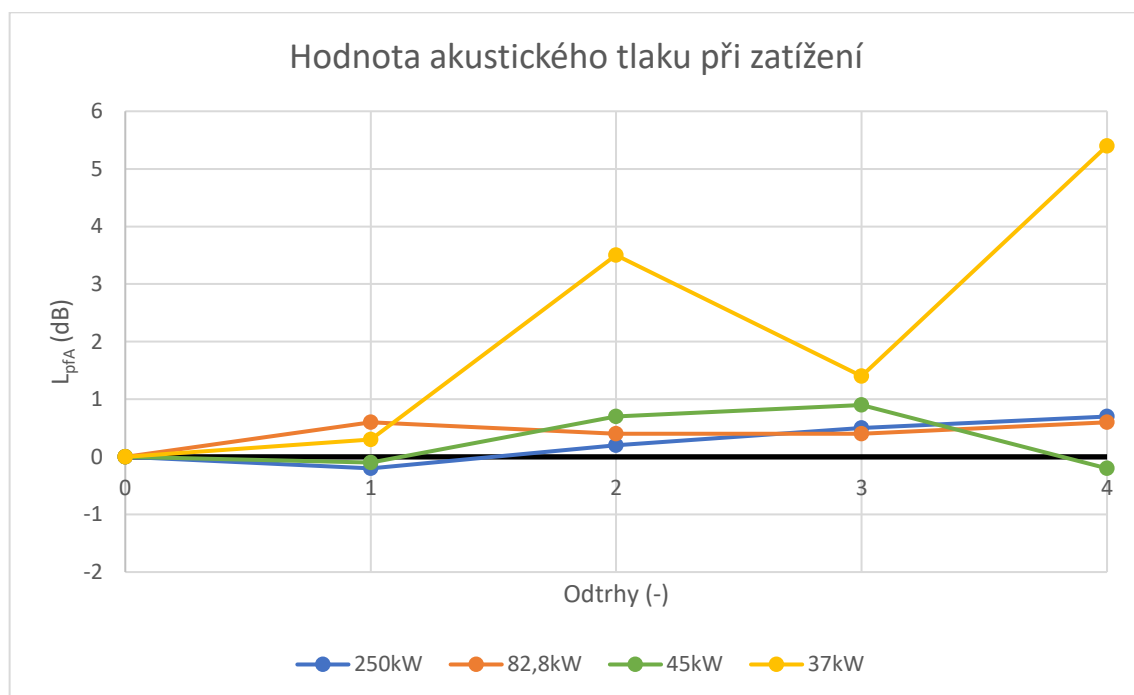


Obrázek 5.4: Průběh změny účinnosti po jednotlivých odrzích

Z grafů změny přídatných ztrát a účinnosti je možné vidět, že ke zlepšení obou parametrů došlo pouze u motoru s výkonem 45 kW, který měl provedené zešíkmení drážek rotoru. U motoru s výkonem 82,8 kW se parametry zlepšovaly pouze do 3 odrthu rotorové klece. Po 4 održení byly přídatné ztráty stále nižší než původní, ale účinnost prudce klesla až pod původní hodnotu. To bylo nejspíš způsobené nárůstem ztrát třením a ventilací, jak bylo zvýrazněno v tabulce *tab. 5.9*. Ostatní testované motory s výkonem 37 kW a 250 kW nevykazovaly snížení přídatných ztrát, naopak održení způsobilo mírný nárůst, především u motoru s výkonem 250 kW, kde došlo i ke zhoršení účinnosti.



Obrázek 5.5: Průběh změny vibrací po jednotlivých odtržích



Obrázek 5.6: Průběh změny hodnoty akustického tlaku po jednotlivých odtržích

Provedení odtržení rotorové klece může způsobovat i negativní vlivy na parametry motoru. Může nastat mírné vyosení a zvětšení asymetrie, které se dá při měření zachytit změnou vibrací nebo zvýšením hodnoty akustického tlaku. Z grafů změn těchto veličin po odtržích rotorové klece je vidět, že zhoršení vibrací se projevilo u dvou motorů s výkonem 45 kW a 82,8 kW. Zvýšení hodnoty akustického tlaku při zatížení se projevilo u motoru s výkonem 37 kW, 82,8 kW a 250 kW. Přestože nebyly

překročeny maximální dovolené hodnoty těchto veličin, prokazatelně došlo ke zhoršení mechanických parametrů motoru.

Tabulka 5.13: Vliv geometrie rotoru na úspěšnost odtržení rotorové klece

Parametry motoru	Jednotky	Vzorek1	Vzorek2	Vzorek3	Vzorek4
Výkon	kW	37	45	82,8	250
Osová výška	mm	225	225	280	315
Průměr rotoru	mm	232,8	232,8	261,8	309,6
Délka paketu	mm	230	290	270	446
Poměr d/l	-	1,012	0,803	0,97	0,694
Zešikmení tyčí	°	3,88	3,067	0	0
Změna po 4 odtržení					
Přídavné ztráty při zatížení	W	↑14,3	↓38	↓100,3	↑140,9
Účinnost	%	↑0,03	↑0,15	↓0,11	↓0,1
Záběrný moment – poměrná hodnota	-	↓0,02	↓0,03	↓0,2	0,01

Při porovnání vlivu geometrie na úspěšnost provedení odtržení rotorové klece je podle tabulky *tab. 5.10* vidět, že u motorů s jmenovitým výkonem 37 kW a 45 kW bylo dosaženo úspěšného provedení pouze u motoru s výkonem 45 kW, přičemž oba motory mají stejnou osovou výšku a zešikmení tyčí rotoru. Liší se od sebe pouze délkou paketu, a tedy i poměrem průměru k délce rotoru. To znamená, že rozdíly impedancí rotorových tyčí budou odlišné, přičemž velikost příčného odporu závisí nepřímo úměrně na délce vodiče. Dále bylo v teoretické části uvedeno, že přídavné ztráty způsobené příčnými proudy rostou přibližně s druhou mocninou délky rotoru, tím pádem u motoru s delším rotorem se omezení příčných proudů může více projevit na velikosti přídavných ztrát.

U motorů s nezešikmenými rotorovými tyčemi s jmenovitými výkony 82,8 kW a 250 kW nedošlo ke zvýšení účinnosti ani u jednoho vzorku motoru. Tyto motory se od sebe lišily osovou výškou a poměrem šířky ku délce rotorového paketu, přičemž motor s jmenovitým výkonem 250 kW se oproti ostatním motorům lišil výrazně nižším poměrem průměru k délce rotoru. U motoru s jmenovitým výkonem 82,8 kW došlo ke snížení přídavných ztrát o 100,3 W, ale vlivem nárůstu ztrát třením a ventilací po čtvrtém odtrhu nedošlo ke zvýšení účinnosti. Po třetím odtrhu došlo k zvýšení účinnosti o 0,18 %, takže za předpokladu, že hodnota ztrát ventilací u čtvrtého odtrhu byla zkreslená nebo špatně změřená je pravděpodobné, že odtrhy byly úspěšné.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo měření a vyhodnocení provedení odtrhů rotorové klece, jako jedné z metod snižování dodatečných ztrát asynchronního elektromotoru s litou klecí nakrátko. Přídavné ztráty se touto metodou snižují pomocí izolování klece, způsobené nárůstem teploty a vytvoření izolační vrstvy na tyčích rotoru, které sníží příčné proudy tekoucí mezi tyčemi rotoru. Měření se provádělo ve zkušebně SIEMENS na čtyřech vzorcích asynchronních motorů s různým jmenovitým výkonem (37 kW, 45 kW, 82,8 kW a 250 kW). U každého motoru se aplikovaly postupně čtyři odtrhy rotorové klece, přičemž po každém odtrhu se provedlo opětovné přeměření parametrů motoru, které mohly být při odtržení ovlivněny. U každého zkoumaného vzorku motoru byly do vyhodnocení o úspěšnosti metody zahrnuty elektrické i konstrukční parametry motoru a vliv pozitivních i negativních dopadů po odtržení rotorové klece.

Při měření motoru s jmenovitým výkonem 37 kW a zešíkmenými rotorovými drážkami o $3,88^\circ$ došlo po čtvrtém odtrhu ke zvýšení účinnosti o 0,03 %, ale přídavné ztráty při zatížení byly o 14,3 W vyšší. Hodnota akustického tlaku se zvýšila o 5,4 dB, ale vibrace při pevné montáži stroje zůstaly téměř stejné. Z toho vyplývá, že vliv odtrhů klece neměl na parametry motoru výraznější vliv.

Nejlepší výsledky byly dosaženy u motoru s jmenovitým výkonem 45 kW a zešíkmením rotorových drážek o $3,067^\circ$, kde se přídavné ztráty při zatížení snížily o 38 W a účinnost se zvýšila o 0,15 %. Negativní vlivy se projevily u vibrací, kde byla hodnota více než dvojnásobná. Z těchto výsledků je vidět, že byly splněny předpoklady odtrhů a projevily se pozitivní i negativní vlivy této metody.

Měření motoru s jmenovitým výkonem 82,8 kW a nezešíkmenými rotorovými drážkami došlo po čtvrtém odtrhu ke snížení dodatečných ztrát při zatížení o 100,3 W. Při posledním odtrhu narostla také hodnota ztrát třením a ventilací o 197,3 W proti počáteční hodnotě, tudíž konečná hodnota účinnosti byla o 0,11 % nižší. Naměřené hodnoty vibrací při pevné montáži se téměř nezměnily. V tomto případě bez opětovného přeměření nelze kvůli výsledné účinnosti jednoznačně dokázat úspěšnost metody.

Při měření motoru s výkonem 250 kW a nezešíkmenými rotorovými drážkami nedošlo po žádném z odtrhů k snížení dodatečných ztrát při zatížení a ani k zvýšení účinnosti. Hodnoty akustického tlaku ani vibrací při pevné montáži se také výrazně nezměnily. Z těchto výsledků je vidět, že odtrhy klece neměly na motor pozitivní ani negativní vliv.

Podle teoretických studií je velikost příčných proudů, a tím i přídavných ztrát od nich vzniklých mnohem větší u rotorů se zešíkmenými tyčemi, jak je uvedeno v literatuře [5]. Díky tomu, u těchto typu rotorů je snížení přídavných ztrát příčnými proudy znatelnější, což je patrné na *tabulce 5.13*, kde u obou vzorků došlo k mírnému zvýšení účinnosti. Dalším konstrukčním prvkem, který může velikost příčných proudů ovlivnit je poměr průměru k délce rotorového paketu. Při měření ovšem nebyl tento předpoklad potvrzen, což je do značné míry způsobeno velmi malým počtem vzorků měřených motorů a některé měření tedy mohou vykazovat určité odchylky nebo zkreslení, které nebylo možné odhalit nebo specifikovat. Velký vliv na velikost příčných proudů a to, zda mezi jednotlivými tyčemi budou protékat, má právě izolování klece, které vzniká při odtržení. Izolováním tyčí rotorové klece se zabývá několik zahraničních experimentálních výzkumů a odborných článků, jako např. [6],[9].

Z uvedených naměřených výsledků je vidět, že není možné jednoznačně určit, zda je metoda odtržení rotorové klece dostatečně účinná. Její zavedení na každém motoru by nemělo opodstatnění ani zaručené zlepšení účinnosti motoru. Při používání této metody je nutné přihlížet i na negativní vlivy zvýšením vibrací, které byly u některých vzorků motorů až dvojnásobné. Využití odtrhů rotorové klece v praxi je možné, jako doplňková metoda snížení přídatných ztrát, především u motorů se zešikmenými rotorovými drážkami, při nevyhovujících hodnotách účinnosti již vyrobeného motoru.

Použitá literatura

- [1] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1988. ISBN 04-531-88.
- [2] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valeria HRABOVCOVÁ. *Design of Rotating Electrical Machines*. Second edition. 2014. ISBN 978-1-118-58157-5.
- [3] BOLDEA, Ion a Syed A. NASAR. *The induction machines design handbook*. Second edition. USA, 2010. ISBN 978-1-4200-6668-5.
- [4] ČSN EN 60034-2-1, Točivé elektrické stroje – Část 2-1: Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek. Český normalizační institut, 2008. ed. 2.
- [5] HELLER, Bedřich a Václav HAMATA. *Přídavná pole, síly a ztráty v asynchronním stroji*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1961.
- [6] S. Williamson and A. C. Smith, "Equivalent circuits for cage induction motors with inter-bar currents," in IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 149, no. 3, pp. 173-183, May 2002.
- [7] COKER, Eric N. The oxidation of aluminum at high temperature studied by Thermogravimetric Analysis and Differential Scanning Calorimetry. 2013.
- [8] PETROV, G.N. *Elektrické stroje* 2. 2. dopln. vydání. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1982.
- [9] Y. N. Feng, J. Apsley, S. Williamson, A. C. Smith and D. M. Ionel, "Reduced Losses in Die-Cast Machines With Insulated Rotors," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, no. 3, pp. 928-936, May-june 2010.
- [10] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní stroje*. Ostrava, 2001. ISBN 80-7078-857-7.
- [11] R. Carlson, C. A. da Silva, N. Sadowski, Y. Lefevre and M. Lajoie-Mazenc, "Analysis of the effect of inter-bar currents on the performance of polyphase cage-induction motors," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, no. 6, pp. 1674-1680, Nov.-Dec. 2003, doi: 10.1109/TIA.2003.818995.

Seznam příloh

Příloha A: Záznam měření vybraného motoru